



# **INDUKTIOUUNIN AIHEUTTAMA LOISTEHO- JA YLIAALTO-ONGELMA**

Mika Pullinen

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2013  
Sähkötekniikan koulutusoh-  
jelma  
Sähkövoimatekniikan suun-  
tautumisvaihtoehto

**TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU**  
Tampere University of Applied Sciences

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

MIKA, PULLINEN:

Induktiouunin aiheuttama loisteho- ja yliaalto-ongelma

Opinnäytetyö 52 sivua  
Huhtikuu 2013

---

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä induktiouunin aiheuttamiin loisteho- ja yliaalto-ongelmiin Valkeakosken Metso Paper Oy:n tehtaalla. Työssä selvitettiin induktiouunin aiheuttamia ongelmia tehtaan muuhun sähköverkkoon. Tarkoituksena oli selvittää induktiouunin mahdollinen kompensoinnin tarve ja esittää tähän mahdollinen ratkaisuehdotus.

Induktiouunille on tehty sähkön laatumittaukset verkkoanalysaattorilla. Verkkoanalysaattorin mittausdatasta koottiin graafiset mittaustulokset eri sähköisistä suureista ajan suhteessa sekä tutkittiin hetkellisiä ilmiöitä kuormituksesta. Mittaustuloksia tutkittiin ja analysoitiin sekä tehtiin johtopäätöksiä induktiouunin aiheuttamista ongelmista sähköverkkoon.

Työn tuloksena annettiin työn tilaajalle selvitys induktiouunin aiheuttamista ongelmista, joita mittaustuloksista ilmeni. Induktiouuni ottaa loistehoa sähköverkosta ja aiheuttaa tästä syystä tulevaisuudessa kustannuksia loistehomaksuina. Induktiouuni tuottaa yliaaltovirtoja, mutta ei aiheuta ongelmia sähköverkkoon. Yliaalto-ongelman sähköverkkoon aiheuttaa jokin toinen yliaaltolähde.

Tehtaaseen tarvittava laitteisto on loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus. Korkean jännitesärön takia kohteessa tarvitaan yliaaltosuodatin, joka suodattaa pois 250 Hz:n harmonisen yliaallon. Laitteiston soveltuvuuden varmistamiseksi vaaditaan lisää mittauksia. Tehdyt mittaukset olivat suuntaa antavia ja kartoittivat tehtaan sähköverkon nykytilan.

---

Asiasanat: loisteho, yliaallot, kompensointi

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree programme in Electrical Engineering  
Option of Electrical Power Engineering

MIKA, PULLINEN:

Reactive Power and Harmonics Problem Caused by Induction Furnace

Bachelor's thesis 52 pages

April 2013

---

The purpose of this thesis is to examine the reactive power and the harmonic problems caused by the induction furnace in Metso Paper Plc's Valkeakoski factory. The project will work out the problems that the induction furnace has caused to other to the other electrical network of the factory. The intention is to determine the possible compensation need and to present this proposed decision.

Power quality measurements have been made to the induction furnace with a network analyzer. Graphic measurement results were derived from the network analyzer measurement data with different electrical variables in relation to time as well as examined transient phenomena in the load. Measurements results have been examined and analyzed and conclusions have been made regarding problems caused by the induction furnace to the electrical network.

The results of the work were given to the subscriber in a report about problems that the measurements revealed. Induction furnace takes reactive power from the electrical network and is thereby causing costs in the form of reactive power payments. Induction furnace generates harmonic currents, but doesn't cause problems to the electrical network. Harmonic problem caused in the electrical network is have some other harmonic source.

The necessary equipment for the factory is reactive power compensation and harmonic filtering. Due to high voltage distortion, a harmonic filter, which filters out the 250 Hz harmonic frequencies is needed. To ensure the suitability of the equipment requires more measurements. Measurements were approximate and plot the electrical networks present situation.

---

Key words: reactive power, harmonic, compensation

## ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Valkeakosken Metso Paper Oy:lle. Opinnäytetyön aiheen sain kesätyöpaikkani Metso Paper Oy:n kautta, jossa olen suorittanut koulutukseen liittyvät työharjoittelut. Haluan kiittää työn valvojana yrityksestä toiminutta kunnossapitopäällikköä Jussi Savolaista, sekä yrityksen yhteistyöhenkilönä toiminutta sähköasentajaa Rami Syrjää. Suuret kiitokset kuuluu Tampereen ammattikorkeakoulun opinnäytetyön ohjaajana toimineelle Klaus Virtaselle. Erityisesti haluan kiittää insinööri Janne Ketolaa asiantuntemuksesta ja mittaustuloksista, jotka sain käyttööni opinnäytetyöhöni. Lämpimät kiitokset myös kaikille muille ympärilläni toimineille henkilöille, jotka avustivat ja kannustivat minua opinnäytetyöprosessin aikana.

Valkeakoskella 11.4.2013

Mika Pullinen

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	8
2	SÄHKÖN LAATU .....	9
2.1	Loisteho .....	9
2.2	Yliaallot .....	10
2.3	Standardit ja suositukset .....	12
2.3.1	Yliaaltojännitteet.....	13
2.3.2	Yliaaltovirrat .....	15
3	KOMPENSOINTI JA SUODATUS .....	17
3.1	Kompensoinnin syyt .....	17
3.2	Loistehon kompensoinnin tekniset vaikutukset.....	18
3.2.1	Kompensoinnin tekniset hyödyt.....	19
3.2.2	Kompensoinnin tekniset haitat.....	22
3.3	Kompensoinnin toteutus .....	22
3.4	Laiteratkaisut .....	23
3.4.1	Rinnakkaiskondensaattoriparisto .....	24
3.4.2	Estokelaparisto .....	25
3.4.3	Yliaaltosuodatin .....	26
3.4.4	Aktiivisuodatin.....	27
3.4.5	Tyristorikytetty kondensaattoriparisto ja kompensaattori.....	29
3.4.6	Staattinen kompensaattori .....	29
3.4.7	Kytkin- ja suojalaitteet .....	29
3.5	Kompensointilaitteiden mitoitus.....	30
3.6	Kompensointilaitteiden valinta .....	31
4	INDUKTIOUUNI .....	32
4.1	Käyttö ja toiminta .....	32
4.2	Laitteisto .....	32
4.2.1	Muuntaja .....	33
4.2.2	Tasasuuntaussilta.....	33
4.2.3	Tasoituskuristin.....	34
4.2.4	Vaihtosuuntaaja.....	34
4.2.5	Uuni ja kondensaattorit .....	34
4.2.6	Käynnistyslaite.....	35
5	SÄHKÖN LAADUN MITTAUS JA TULOSTEN ANALYSOINTI .....	36
5.1	Lähtökohta .....	36
5.2	Mittaustapa.....	36
5.3	Mittaaminen .....	37

5.4	Mittaustulosten käsittely .....	37
5.4.1	Tehot .....	38
5.4.2	Perusaallon tehokerroin.....	39
5.4.3	Kuormitusvirta .....	40
5.4.4	Virran ja jännitteen aaltomuodot.....	41
5.4.5	Virran ja jännitteen aaltomuodon yliaallot.....	41
5.4.6	Virtasärö.....	43
5.4.7	Jännitesärö.....	44
5.5	Sähköverkon kokonaistilanne .....	45
5.6	Yhteenveto .....	47
5.6.1	Tarvittava laitteisto.....	47
5.6.2	Jatkotoimenpiteet .....	47
5.6.3	Kompensoinnin sijoitus.....	48
5.6.4	Kompensoinnin vaikutukset.....	49
6	POHDINTA.....	50
	LÄHTEET.....	52

## LYHENTEET JA TERMIT

$\cos\varphi_1$	tehokerroin ennen kompensointia
$\cos\varphi_2$	tehokerroin kompensoinnin jälkeen
$D$	säröteho
$DPF$	displacement power factor, perusaallon tehokerroin
$f$	taajuus, Hz
$I$	virta, A
$I_h$	yliaaltovirta, A
$I_p$	pätövirta, A
$I_q$	loisvirta, A
$I_{ref}$	liittymän referenssivirta
$k$	ilmaisosuus
$P$	kokonaispätöteho, W
$P_1$	perustaajuinen pätöteho, W
$PF$	power factor, kokonaistehokerroin
$P_k$	kuormitushäviö, W
$P_{max}$	pätötehon huippuarvo, W
$Q$	kokonaisloisteho, VAr
$Q_1$	perustaajuinen loisteho, VAr
$Q_{lask}$	laskutettava loisteho
$Q_{max}$	loistehon huippuarvo
$R$	resistanssi, $\Omega$
$S$	kokonaisnäennäisteho, VA
$S_1$	perustaajuinen näennäisteho, VA
$THD$	total harmonic distortion, harmoninen kokonaissärö
$U_h$	yliaaltojännite, V
$U_N$	nimellisjännite, V
$X$	reaktanssi, $\Omega$
$\Delta U$	jännitteen alenema, V

## 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Metso Paper Oy Valkeakosken tehtaalla olevan induktiounin aiheuttamaa loisteho ja yliaalto ongelmaa 6 kV:n verkkoon. Induktiouni on käyttöönotettu keväällä 2011 ja sille ei vielä ole toteutettu loistehon kompensointia ja harmonisten yliaaltojen suodatusta. Induktiouni tarvitsee toimiakseen loistehoa ja hetkellä loisteho otetaan sähköverkkoyhtiöltä.

Opinnäytetyössä perehdytään loistehon ja harmonisiin yliaaltojen aiheuttamiin verkko-vaikutuksiin sähkönkuluttajan ja sähköverkkoyhtiön kannalta. Työssä esitellään erilaisia laiteratkaisuja loistehon ja harmonisten yliaaltojen kompensointiin sähköverkosta. Työssä tutustutaan yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuuksiin ja laatuun.

Työssä tutkitaan ja analysoidaan induktiounille tehdyn sähkön laatumittauksen mittatuloksia ja suoritetaan niiden perusteella johtopäätöksiä induktiounin aiheuttamista ongelmista. Tuloksia verrataan standardeihin ja tehdään niiden perusteella päätelmät sähkön laadusta. Ainoastaan induktiounin vaikutuksia sähköverkkoon ei katsota, vaan myös katsotaan kokonaistilannetta tehtaan sähköverkossa. Näiden seikkojen pohjalta vedetään johtopäätöksen verkon kokonaistilanteesta ja esitetään jatkotoimenpiteet, kuinka asiakas voisi parantaa sähköverkkonsa nykytilaa.

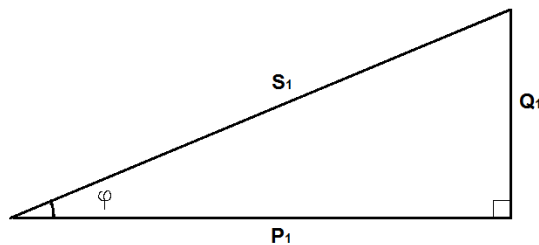
Tämän työn tavoitteena on kartoittaa Metso Paper Oy Valkeakosken keväällä 2011 käyttöönotettaman induktiounin vaikutuksia sähköverkkoon sähkön laatumittauksien pohjalta. Sähkön laatumittauksien perusteella luodaan kuvaus induktiounin aiheutuvista ongelmista, kuten loistehon ja yliaaltojen osalta sekä katsotaan näiden vaikutusta kokonaisuutena sähköverkossa. Työn tuloksena esitetään jatkotoimenpiteet ja esitetään tarvittava kompensointilaitteisto, jolla aiheutuvia ongelmia saadaan pienennettyä tai jopa poistettua kokonaan sähköverkosta.



## 2 SÄHKÖN LAATU

### 2.1 Loisteho

Loisteho on sähköverkossa siirtyvää tehoa, jota ei saada hyödynnettyä työn tekemiseen vaan pelkästään kuormittaa verkkoa. Monet sähkölaitteet vaativat toimiakseen pätötehon lisäksi myös loistehoa. Pätö- ja loistehosta muodostuu näennäisteho (kaava 1). Pätö- ja näennäistehon suhde muodostavat tehokertoimen  $\cos\varphi$  (kaava 2). Näiden perustaajusten tehojen muodostumista kuvataan tehokolmiolla (kuva 1). (Uusimäki 2004, 2)



KUVA 1. Tehokolmio (Uusimäki 2004, 2)

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (1)$$

jossa  $S_1$  on perustaajuinen näennäisteho

$P_1$  on perustaajuinen pätöteho

$Q_1$  on perustaajuinen loisteho

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = DPF \quad (2)$$

jossa  $\cos \varphi$  on perusaallon tehokerroin

$DPF$  on Displacement Power Factor

Loistehoa tarvitsevia laitteita ovat esimerkiksi tyristoriohjatut kuormat, oikosulkumoottorit, muuntajat ja purkauslamput. Loisteho voidaan jakaa induktiiviseen ja kapasitiiviseen loistehoon. Virran ollessa jännitettä jäljessä, on kuorman ottama loisteho induktiivista ja virran ollessa jännitettä edellä, on kondensaattorin tuottama loisteho kapasitiivista. Kuormat, kuten tyristorit ja moottorit kuluttavat induktiivista loistehoa ja puoles-

taan kapasitiiviset kuorman, kuten kondensaattori tuottavat kapasitiivista loistehoa. Tästä syystä kondensaattoria käytetäänkin kompensoimaan induktiivisen kuorman vaatimaa loistehoa. Kompensoinnissa kuorman induktiivinen virta  $+90^\circ$  ja kondensaattorin kapasitiivinen virta  $-90^\circ$  summautuvat  $180^\circ$  vaihesiirrosta johtuen nolllaksi, ja jäljelle jää ainoastaan vain kuorman ottama pätövirta eli pätöteho. (Naskali 2010, 11)

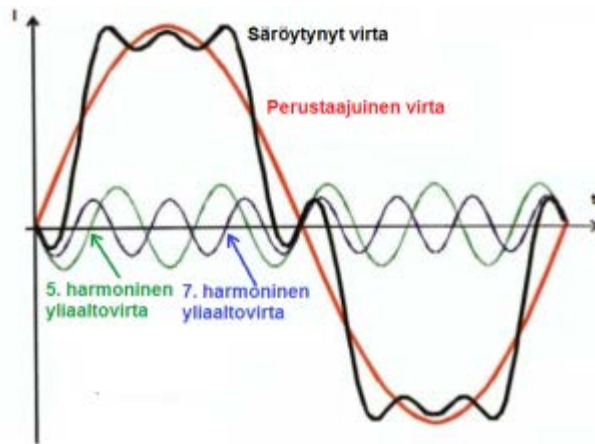
Loisteho siirto pienentää verkon siirtokapasiteettiä. Näennäistehosta saadaan laskettua kuorman ottama virta ja tämä sisältää pätötehon lisäksi myös loistehon. Loistehon siirtäminen lisää johtojen ja muuntajien häviöitä. Loisvirta aiheuttaa häviökustannuksien kasvua pätöteho- ja energiahäviöistä johtuen verrattuna pelkkään pätötehon siirtoon. Tämän takia olisi edullisinta tuottaa loisteho mahdollisimman lähellä kulutuspistettä. (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, R., Seesvuori, V. & Wilén 2006, 20)

## 2.2 Yliaallot

Yliaallot ovat seurausta verkon vaihtojännitteen ja -virran säröytymisestä eli niiden käyrämuoto poikkeaa sinimuodosta. Epälineaariset kuormitukset aiheuttavat epäsinimuotoisen kuormitusvirran. Esimerkiksi kolmivaiheisen tasasuuntaussillan verkosta ottama virta voi olla kanttimaista ja tämän seurauksena aiheutuu kuormitusvirran poikkeaminen sinimuotoisesta virrasta. Epäsinimuotoisen kuormitusvirran seurauksena myös verkkojännite säröytyy. Perustaajuisesta sinikäyrästä poikkeavat virrat saavat aikaan jännitteen säröytymään, koska virrat aiheuttavat verkon impedansseissa jännitehäviöitä. Virran särö on useimmiten jännitteen säröä suurempi, johtuen verkon impedanssin pienuudesta. Myös säröytynyt jännite saattaa aiheuttaa lineaarisillakin kuormituksilla sinimuodosta poikkeavia virtoja. Epälineaarisia kuormituksia ovat esimerkiksi tasa- ja vaihtosuuntaajakäytöt, hakkuriteholähteet ja taajuusmuuttajat. Epälineaaristen kuormituksen seurauksena verkon perustaajuiseen sinikäyrään summautuu suurempia taajuuksia, jota kutsutaan harmonisiksi ja epäharmonisiksi yliaalloiksi. (Männistö ym. 2006, 26, 30)

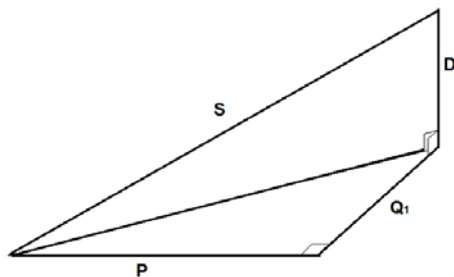
Suomen yleisen jakeluverkon nimellistaajuus on 50 Hz. Epälineaarinen kuormitus aiheuttaa tämän taajuuden harmonisia yliaaltoja, että myös epäharmonisia yliaaltoja. Harmoninen yliaalto taajuus on sinimuotoinen jännitekomponentti, jonka taajuus muodostuu perustaajuisesta jakelujännitteestä kokonaisluvulla (järjestysluvulla) kerrottuna. Epäharmoninen yliaalto taajuus on sinimuotoinen jännitekomponentti, jonka taajuus

muodostuu harmonisten yliaaltojen väliin, eli perusaallon taajuus ei ole kokonaisluvulla kerrottavissa. Perustaajuiseen sinikäyrään summatutuvat yliaallot aiheuttavat käyrämuodon vääristymistä eli säröytymistä (kuva 2). (Männistö ym. 2006, 27)



KUVA 2. Perustaajuinen virta, 5. ja 7. yliaaltovirta ja niiden yhteenlaskettu virta (Männistö ym. 2006, 28)

Jännitteen ja virran säröytyminen vaikuttaa myös tehoihin. Yliaallot huomioitaessa tehoista muodostuu kokonaispäto-, kokonaislois- ja kokonaisnäennäisteho sekä lisäksi yliaaltojen muodostamaa särötehoa. Säröteho saadaan kokonaisnäennäis- ja kokonaispäto-tehosta sekä perustaajuisesta loistehosta (kaava 3). Särötehoa ei ole mahdollista kompensoida kompensointilaitteilla, jotka ovat mitoitettu perustaajuudelle, koska säröteho koostuu harmonisista yliaaltotaajuuksista. Tehot summautuvat yhdessä osoitinkuvaksi (kuva 3). Kokonaistehokertoimella PF kuvataan kokonaispäto- ja kokonaisnäennäistehon suhdetta (kaava 4). Loistehon kompensointi mitoitetaan perustaajuisen loistehotarpeen mukaan. (Uusimäki 2004, 2; Männistö ym. 2006, 36)



KUVA 3. Särötehojen summautuminen osoittimina (Uusimäki 2004, 2)

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_1^2} \quad (3)$$

jossa  $D$  on säröteho  
 $S$  on kokonaisnäennäisteho  
 $P$  on kokonaispätöteho

$$\frac{P}{S} = PF \quad (4)$$

jossa  $PF$  on Power Factor, kokonaistehokerroin

Yliaallot aiheuttavat paljon haitallisia häiriöitä sähköverkolle ja sähkönkäyttäjien laitteille sekä laitteiden kuormitettavuuden alentumista. Yliaallot kasvattavat häviöitä tehonsiirrossa ja sähköverkon komponentit altistuvat ylimääräiselle lämpenemälle ja niiden eristeet heikkenevät. Yliaallot lisäävät virhetoimintoja automaatiolaitteissa ja suojarileissä sekä aiheuttavat virhenäyttämiä mittareissa. Laitteiden toimintahäiriöt lisääntyvät tehoelektroniikan laitteiden lisääntyessä ja usein sähkönkäyttäjän omien laitteiden aiheuttamat yliaaltovirrat ja muut häiriöt ovat syynä muiden laitteiden häiriöille ja vikaantumiselle. Edellä kuvatut yliaaltojen aiheuttamat vaikutukset ilmenevät resonanssitilanteissa, jotka ovat haitallisimpia yliaaltoihin liittyviä ilmiöitä. (Männistö ym. 2006, 30)

Resonanssi aiheuttaa usein yliaaltovirtojen tai -jännitteiden vahvistumista normaaleihin tilanteisiin verrattuna tilanteissa, joissa verkon resonanssitaajuus on lähellä yliaallon taajuutta. Yliaallot saattavat pysyä sallituissa rajoissa yliaaltolähteen liittymiskohdassa, mutta saattavat vahvistua jossain muualla verkossa verkon impedanssien paikkariippuvuuden vuoksi resonanssin seurauksena. Resonanssi voi esiintyä sähköverkossa sarjaitai rinnanresonanssina. (Männistö ym. 2006, 35, 65)

### 2.3 Standardit ja suositukset

Jakeluverkon haltija vastaa liittymiskohdassa sähkön laadusta. Liittymiskohdan sähkön laatua tarkastellaan standardissa SFS-EN 50160 "Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet" määriteltyjen yliaaltojännitteiden ja jännitteen kokonaissäröjen mukaan. Liittymiskohdassa tarkastellaan lisäksi syntyneitä yliaaltovirtoja, johon standardi IEEE

519 on määrittänyt rajat yliaaltovirtojen ja virran kokonaissäröjen mukaan. Standardit eivät ota kantaa liittymispisteen jälkeen sähkönkäyttäjän itse aiheuttamiin yliaaltomääriin ja niiden vaikutuksiin, mutta halutessaan sähkönkäyttäjä voi verrata omaa sähkön laatuaan niihin. (Männistö ym. 2006, 42)

Jännitteen laadulle asetettu standardi on aina ensisijaisesti määräävä ja lähtökohtana tälle on, että jännitteen laatu on standardin mukainen, jos virran suositukset täytetään. Verkon yliaaltovirrat johtavat jännitteen säröytymiseen ja siksi nämä on huomioitava jännitteen laatua tarkasteltaessa. (Männistö ym. 2006, 43)

### **2.3.1 Yliaaltojännitteet**

Yleisen jakeluverkon jännitteelle on määritetty standardi SFS-EN 50160 Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. Standardi pitää sisällään jännitteelle asetetut vaatimukset sähkönkäyttäjän liittymäpisteessä yleisissä pien- ja keskijännitteisissä jakeluverkoissa normaaleissa käyttötilanteissa. Standardia ei voida soveltaa poikkeuksellisissa vikatilanteissa. (Männistö ym. 2006, 21)

Standardin SFS-EN 50160 lisäksi Sähköenergialiitto ry (Sener) on määritellyt laatuluokkia eri laatutekijöille julkaisussaan "Jakeluverkon sähkön laadun arviointi", joita voidaan käyttää hyödyksi sähkönlaadun arvioinnissa. Sähkön toimituksen laatua julkaisussa käsitellään toimintavarmuuden, jännitteen laadun ja palvelun laadun näkökulmasta sekä määritetty jännitteen ominaisuudet kolmeen suuntaa-antavaan laatuluokkaan. Suositus on julkaistu alun perin vuodelta 1996 ja päivitetty vuonna 2001. Suosituksen tarkoituksena on tarkentaa sähkön laatuun liittyviä määrittelyitä ja auttaa arvioimaan jännitteen laatuominaisuuksien merkitystä sähkölaitteille. (Lehtomäki, Mäkinen, Parvio, Salminen, Seesvuori & Seppälä 2001, 5)

Jakeluverkon jännitteeseen summautuneiden harmonisten yliaaltojännitteiden suuruutta arvioidaan kokonaissäröllä (THD) tai yksittäisen yliaaltojännitteen suuruutta perustajuiseen jännitteeseen verrattuna (kaava 5). Standardin SFS-EN 50160 mukaan viikon pituisen mittausjakson aikana normaaleissa käyttöolosuhteissa jakelujännitteet jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteet tehollisarvon 10 minuutin keskiarvosta tulee olla 95 % ajasta pienempi tai yhtä suuri kuin standardissa SFS-EN 50160 annettu arvo (

taulukko 1). Lisäksi harmoninen kokonaissärö (THD) jakelujännitteellä tulee olla enintään 8 %, kun huomioidaan kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40:een saakka. Taulukossa on esitettyssä standardin SFS-EN 50160 mukaiset rajat jännitesärölle THD-arvoina järjestyslukuun 25 saakka. (Männistö ym. 2006, 21)

$$THD_U = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}{U_1^2}} \quad (5)$$

jossa  $THD_U$  on harmoninen jännitesärö

$U_h$  on yliaaltojännite

$U_1$  on perustaajuinen jännite

Standardin SFS-EN 50160 lisäksi Sener on määrittänyt suosituksen sähkön laadulle ja määritetty laatuluokiksi korkea- ja normaali laatu. Korkealaatu tarkoittaa, että harmoninen kokonaissärö on enintään 3 % ja normaalilaatu tarkoittaa, että harmoninen kokonaissärö on enintään 6 % ja yksittäiset harmoniset yliaaltojännitteet taulukon 1 rajoissa. (Lehtomäki ym. 2001, 24)

TAULUKKO 1. Standardin SFS-EN 50160 mukaiset rajat jännite- ja kokonaissärölle prosentteina. (Seesvuori, Böstman, Hiltunen, Laitinen, Mäkinen, Salovaara & Sotikov 1999, 21)

Parittomat yliaallot, kolmella jaottomat		Parittomat yliaallot, kolmella jaolliset		Parilliset yliaallot	
Järjestys- luku h	Yliaalto- jännite %	Järjestys- luku h	Yliaalto- jännite %	Järjestys- luku h	Yliaalto- jännite %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				
Kokonaissärö THD 8 %.					

### 2.3.2 Yliaaltovirrat

Standardi IEEE 519 on määrittänyt suositeltavat rajat virransäroille yleisen jakeluverkon pien- ja keskijänniteverkon liittymäpisteessä (taulukko 2 ja taulukko 3). Sallitut yliaaltovirrat on suhteutettu sähkönkäyttäjälle varatun siirtokapasiteetin mukaan referenssivirran perusteella (kaava 6). Mikäli yliaaltovirrat ylittyvät sallitut, on sähkönkäyttäjä velvollinen pienentämään yliaaltovirtoja tai neuvoteltava verkonhaltijan kanssa siirtokapasiteetin kasvattamisesta. Standardia sovelletaan siten, että sähkönkäyttäjä vastaa laitteistollaan mahdollisesti tuotetuista harmonisista yliaaltovirroista sekä niiden aiheuttamista ongelmista verkossa ja sähkön jakelija tai tuottaja vastaa jännitteen laadusta. Virtaan summautuneiden harmonisten yliaaltovirtojen suuruutta arvioidaan kokonaissäröllä (THD) tai yksittäisen yliaaltovirran suuruutta perustaajuiseen virtaan verrattuna (kaava 7). (Männistö ym. 2006, 42–45)

$$I_{ref} = \frac{P}{\sqrt{3}U_N} \quad (6)$$

jossa  $I_{ref}$  on liittymän referenssivirta  
 $P$  on liittymäsopimuksen pätöteho (tilausteho)  
 $U_N$  on verkon nimellisjännite

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_h^2}{I_1^2}} \quad (7)$$

jossa  $THD_I$  on harmoninen virtasäro  
 $I_h$  on yliaaltovirta  
 $I_1$  on perustaajuinen virta

TAULUKKO 2. Sähkönkäyttäjän suurimmat sallitut yliaaltovirrat pienjänniteverkon liittymäkohdassa standardin IEEE 519 mukaan (Seesvuori ym. 1999, 28)

Referenssi- virta	Suositeltava raja	
$\leq 25 \text{ A}$	Saa käyttää laitestandardien mukaisia laitteita.	
$> 25 \text{ A} \dots 200 \text{ A}$	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 10 % referenssivirrasta.	
$> 200 \text{ A}$	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta, mutta kuitenkin vähintään 20 A sallitaan. Lisäksi yksittäisten yliaaltojen osalta:	
	järjestysluku n	sallittu arvo referenssivirrasta
	<11	7,0 %
	11-16	3,5 %
	17-22	2,5 %
	23-34	1,0 %
	>34	0,5 %

TAULUKKO 3. Sähkönkäyttäjän suurimmat sallitut yliaaltovirrat keskijänniteverkon liittymäkohdassa standardin IEEE 519 mukaan (Seesvuori ym. 1999, 28)

Referenssi- virta	Suositeltava raja	
kaikki	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta. Lisäksi eri yliaaltojen osalta:	
	järjestysluku n	sallittu arvo referenssivirrasta
	<11	7,0 %
	11-16	3,5 %
	17-22	2,5 %
	23-34	1,0 %
	>34	0,5 %

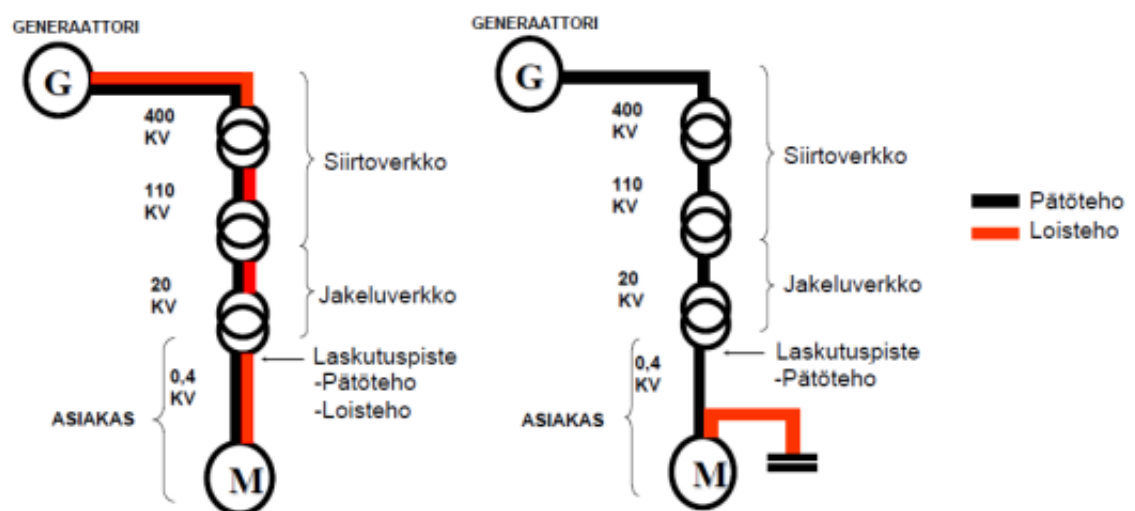


### 3 KOMPENSOINTI JA SUODATUS

#### 3.1 Kompensoinnin syyt

Sähkökäyttäjän loistehon kompensoinnin tarve syntyy lähinnä jakeluverkkoyhtiön perimästä loistehomaksusta. Loistehomaksulla jakeluyhtiö pyrkii ohjaamaan sähkönkäyttäjää hankkimaan oman loistehon kompensointilaitteiston. Lisäksi sähkönkäyttäjä saattaa haluta pienentää oman siirtoverkkonsa häviöitä ja niiden seurauksena syntyneitä kustannuksia. Kuluttaja haluaa kasvattaa siirtokapasiteettiaan tuottamalla loistehon itse. Kuluttajalla saattaa olla tarve suodattaa elektronisten laitteiden aiheuttamia yliaaltoja niiden haittavaikutuksien takia. (Kauppila, Tiainen & Ylinen 2009, 65)

Loissähkön tuottaminen sähköverkkoon on vapaa ja se voidaan tuottaa missä tahansa verkon pisteessä toisin kuin pätöteho, joka tuotetaan voimalaitoksien generaattoreilla (kuva 4). Sähkönkäyttäjä voi ottaa loissähkön sähköverkosta ja maksaa siitä jakeluyhtiölle. Jakeluyhtiö pyrkii loissähkömaksujen avulla kohdistamaan kustannuksia niiden aiheuttajille sekä ohjata sähkönkäyttäjää tuottamaan itse käyttämänsä loisteho kompensointilaitteilla. Tämä alentaa loistehon siirrosta syntyviä kustannuksia. (Naskali 2010, 9–10)



KUVA 4. Loistehon ottaminen verkosta ja loistehon tuottaminen kulutuspaikassa (Naskali 2010, 9–10)

Jakeluyhtiö on määrittänyt loistehoikkunan sähkökäyttäjälle, jonka mukaan laskutetaan kulutetusta loistehosta. Laskutettava loistehon määrä ilmaisosuudet huomioituna voidaan laskea, kun tiedetään kuukauden ajalta loistehon ja pätötehon mitatut huippuarvot sekä ilmaisosuus (kaava 8). Jakeluverkkoyhtiöllä laskutus on määritelty siten, että induktiivisesta loistehohuipusta vähennettävä ilmaisosuus saa olla enintään 16 % ja kapasitiivisesta loistehohuipusta vähennettävä ilmaisosuus enintään 4 % pätötehon arvosta. Sähköyhtiöillä laskutus on puolestaan määritelty siten, että induktiivisesta loistehohuipusta vähennettävä ilmaisosuus saa olla 15–40 % ja kapasitiivisesta loistehohuipusta vähennettävä ilmaisosuus enintään 5 % pätötehoaiipun arvosta. Tämän loistehoikkunan sisällä pysyttäessä kompensointi ei ole tarpeellista, mutta ylitettäessä ilmaisosuus on sähkökäyttäjän harkittava omaa loistehon kompensointia, jos kokee sen kannattavaksi ja saa siitä taloudellista hyötyä. (Seesvuori ym. 1999, 63; Uusimäki 2004, 3)

$$Q_{lask} = Q_{max} - kP_{max} \quad (8)$$

jossa  $Q_{lask}$  on laskutettava loisteho  
 $Q_{max}$  on loistehon mitattu huippuarvo  
 $k$  on ilmaisosuus  
 $P_{max}$  on pätötehon mitattu huippuarvo

Sähkökäyttäjällä saattaa olla paljon epälineaarista kuormitusta sähköverkossaan ja tämä saattaa aiheuttaa yliaalloista johtuvia ongelmia häiriöiden muodossa sähköverkossa ja muissa laitteissa sekä eri laitteiden kuormitettavuuden alenemista. Tällöin on syytä harkita loistehon kompensoinnin lisäksi myös yliaaltojen suodattamista. (Seesvuori ym. 1999, 22)

### 3.2 Loistehon kompensoinnin tekniset vaikutukset

Loistehon kompensoinnilla saavutetaan monia teknisiä hyötyjä sähköverkon kannalta, mutta kompensatiolaitteisto saattaa aiheuttaa myös teknisiä haittoja sähköverkolle. Kompensoimalla loistehoa saavutetaan teknisenä hyötynä siirtokapasiteetin kasvattaminen sekä kuormitushäviöiden ja jännitteen aleneman pieneneminen. Lisäksi pienennetään loistehomaksua. Kompensoidessa loistehoa esiintyy myös teknisiä haittoja, kuten mahdolliset resonanssi-ilmiöt, kondensaattoreiden kytkentätilanteet ja ylikompensointi.

Loistehon kompensointia suunniteltaessa on tärkeä tuntea verkon tekniset ominaisuudet, että mahdolliset ongelmatilanteet voidaan välttää. (Uusimäki 2004, 3; Männistö ym. 2006, 75–78)

### 3.2.1 Kompensoinnin tekniset hyödyt

Kompensoinnilla pystytään vaikuttamaan verkon siirtokapasiteetin kasvattamiseen. Kuorma ottaa näennäistehoa verkosta, jolloin kuormavirtaan vaikuttaa myös loisteho (kaava 9). Kompensoimalla kuorman loisteho, saadaan kokonaisvirtaa pienemmäksi ja tästä seuraa pätötehon siirtokapasiteetin kasvaminen (kaava 10). (Uusimäki 2004, 3)

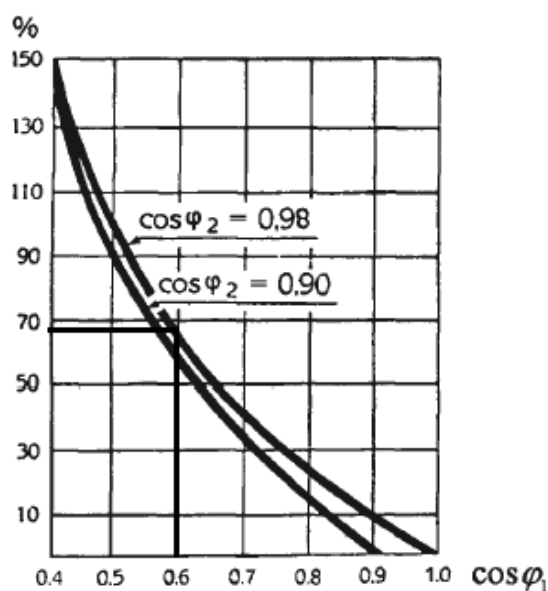
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (9)$$

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (10)$$

jossa

- $I$  on kuorman virta
- $S$  on kuorman näennäisteho
- $U$  on verkon pääjännite
- $P$  on kuorman pätöteho
- $Q$  on kuorman loisteho

Loistehon kompensoinnilla vaikutetaan kuormavirran pienenemiseen ja sitä kautta pätöteho siirtokapasiteetin kasvattamiseen. Loistehon kompensointi johtaa tehokertoimen parantumiseen. Esimerkiksi, jos ennen kompensointi tehokerroin  $\cos\varphi_1$  oli 0,6 ja se kompensoidaan tehokertoimeen  $\cos\varphi_2$  0,98, jolloin siirtokyky kasvaa noin 65 % (kuva 5). (Uusimäki 2004, 3)



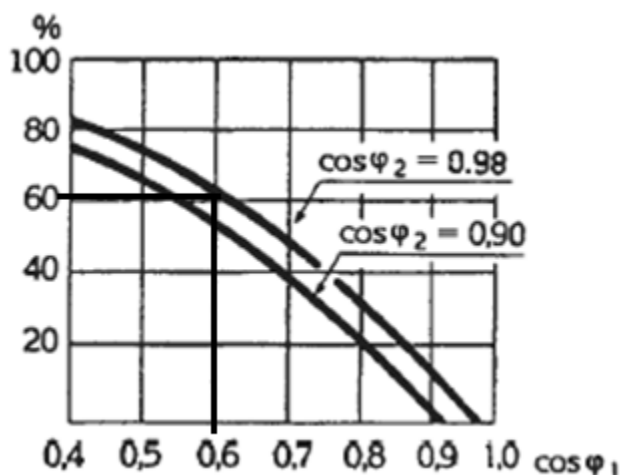
KUVA 5. Verkon siirtokapasiteetin lisäys kompensoinnin vaikutuksesta (Uusimäki 2004, 3)

Loistehon kompensoinnin seurauksena myös kokonaisvirta pienenee ja tämä vaikuttaa sähköverkon kuormitushäviöiden pienemiseen eli lämpötila laskee keskuksissa, kaapeleissa ja muuntajissa. Kuormitushäviöt ovat verrannollisia virran neliöön eli verkon kuormitus vaikuttaa häviöihin voimakkaasti (kaava 11). (Uusimäki 2004, 3)

$$P_k = RI^2 \quad (11)$$

jossa  $P_k$  on kuormitushäviö  
 $R$  on kuormitusresistanssi

Esimerkiksi, jos ennen kompensointi tehokerroin  $\cos \varphi_1$  oli 0,6 ja se kompensoidaan tehokertoimeen  $\cos \varphi_2$  0,98, joka aikaansaa häviöiden pienentymisen noin 60 %:lla (kuva 6) (Uusimäki 2004, 3).



KUVA 6. Verkon häviöiden pieneneminen kompensoinnin vaikutuksesta (Uusimäki 2004, 4)

Loistehon kompensoinnin seurauksena pienenee loisvirta ja tämä vaikuttaa jännitteen alenemaan. Jännitteen alenema pienenee siirtokaapeleilla, joiden poikkipinta-ala on suuri, koska kompensoitu loisvirta ei vaikuta kaapeleiden reaktanssiin (kaava 12). Jännitteen alenema ei ole merkityksellinen alle 16 mm<sup>2</sup> poikkipinta-aloilla, koska reaktanssi on pieni. (Uusimäki 2004, 4)

$$\Delta U = RI_p + XI_q \quad (12)$$

jossa  $\Delta U$  on jännitteen alenema  
 $R$  on koko siirtoverkon resistanssi  
 $X$  on koko siirtoverkon reaktanssi  
 $I_p$  on pätövirta  
 $I_q$  on loisvirta

Yliaaltosuodatuksella saadaan pienennettyä verkon jännitesäröä ja sähkön laatu paranee. Jännitesärön pienentäminen vaikuttaa verkon komponenttien häviöiden pienenemiseen sekä myös verkon sähkölaitteissa esiintyvien häiriöiden ja vaurioiden todennäköiseen pienenemiseen. Yliaaltosuodatuksella saavutettujen edellä mainittujen etujen taloudellista arvoa on vaikea arvioida, koska varmuudella ei voida sanoa sähkölaitteiden häiriöiden tai vaurioiden johtuvan juuri verkossa esiintyvistä yliaalloista. (Uusimäki 2004, 4)

### 3.2.2 Kompensoinnin tekniset haitat

Loistehon kompensointilaite ilman kuristinta saattaa aiheuttaa resonanssi-ilmiöitä muun sähköverkon kanssa. Kondensaattorin kapasitanssi saattaa aiheuttaa muuntajan tai verkon induktanssin kanssa yhdessä rinnakkais- tai sarjaresonanssipiirin, joka aiheuttaa yliaaltovirtojen vahvistumista. Vahvistumiseen vaikuttaa resonanssitaajuuden suuruus suhteessa yliaaltojen taajuuteen sekä verkon resistanssi- tai reaktanssisuhteet. Yliaaltovirrat saattavat vahvistua pienjänniteverkossa tyypillisesti 1–5 kertaiksi ja keskijänniteverkossa jopa 10–20 kertaiksi. (Männistö ym. 2006, 65)

Kondensaattorin kytkeytyessä sähköverkkoon syntyy hetkellinen kytkentävirtapiikki kondensaattorin latautuessa, joka voi olla yli satakertainen nimellisvirtaan verrattuna. Tämän seurauksena verkon jännite saattaa notkahtaa hetkellisesti ja kondensaattorin varauduttua verkon jännite nousee ja syntyy jännitepiikki, joka vaimenee kytkentäilmiön tavoin ja verkon tilanne palaa normaaliksi. Kytkentätilanteen ylijännite saattaa laukaista verkon ylijännitesuojauksia tai aiheuttaa laiterikkoja. (Männistö ym. 2006, 76–77)

Loistehon kompensoinnissa saattaa syntyä ylikompensaatio tilanne, jos käytetään kiinteää kompensointiparistoa ja paristo tuottaa enemmän loistehoa kuin kuorma tarvitsee. Ylikompensaatiota saattaa syntyä kompensointipariston säätäjän vioittuessa tai säätötarkkuuden ollessa väärä. Ylikompensaatioissa tehokerroin menee kapasitiiviselle puolelle ja aiheuttaa korkeaa loistehomaksua, sillä kapasitiivinen loisteho aiheuttaa enemmän ongelma jakeluverkkoyhtiölle kuin induktiivinen loisteho. Ylikompensaatio voi aiheuttaa myös jännitteen nousua, koska kondensaattori lisää verkon ominaiskapasitanssia. Tilanteissa joissa on jännitteen alenemaa, ylikompensaatiolla pystytään kompensoimaan tätä. (Männistö ym. 2006, 77–78)

### 3.3 Kompensoinnin toteutus

Sähkön käyttäjää ohjataan loistehomaksulla siihen suuntaan, että se hoitaisi itse loistehon kompensointitarpeensa. Kompensointi voidaan suorittaa sähköverkon eri pisteissä sen mukaan, mitkä ovat sähkönkäyttäjän tarpeet ja lopulta sen, mikä on teknisesti taloudellisesti tarpeellista ja kannattavaa. Kompensointi voidaan toteuttaa keskitetysti

yhdessä pisteessä, ryhmäkohtaisesti tai laitekohtaisesti. Suositeltavaa kuitenkin on se, että loistehonkompensointi sijoitetaan siihen pisteeseen, jossa loistehon tarve syntyy. (Männistö ym. 2006, 85–86)

Kompensointilaitteistoa suunniteltaessa pitää ottaa huomioon tekniset ja taloudelliset näkökannat, että laitteisto sijoitetaan taloudellisesti kannattavaan paikkaan. Seuraavat seikat on syytä huomioida: (Kauppila ym. 2009, 70)

- kompensointilaitteiden pääoma- ja huoltokustannukset
- laskentakorko ja teknistaloudellinen pitoaika
- kompensointilaitteiden häviökustannukset
- kantaverkkoyhtiön loistehon hinnoittelu
- loistehon ilmaisosuuden hyödyntäminen

### 3.4 Laiteratkaisut

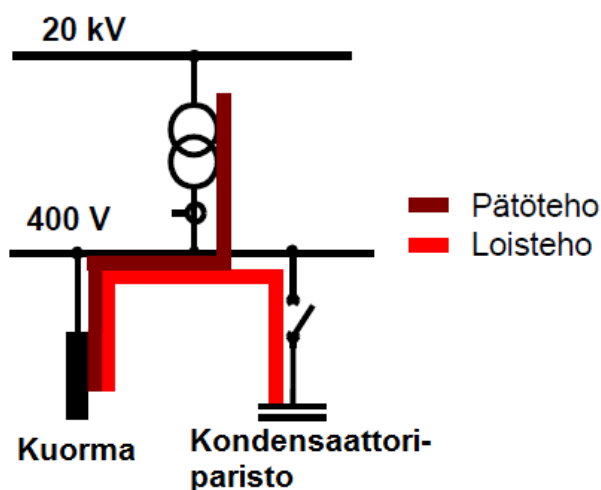
Laiteratkaisujen valintaa ja mitoitusta varten on olemassa omat standardit. Pienjännitteen osalta laiteratkaisuja käsitellään standardissa IEC 60831-1 ja keskijännitteen osalta laiteratkaisuja käsitellään standardeissa IEC 60871-1 ja IEC 61642. (Männistö ym. 2006, 48)

Kompensoinnin toteuttamiseen vaikuttaa kompensoitavan laitteen ominaisuudet, jotka aiheuttavat sähkönlaadun heikkenemistä ja häiritsevät muuta verkkoa. Loistehon tarve ja verkon yliaaltopitoisuus ovat merkittäviä seikkoja valittaessa laitteistoratkaisuja. Kompensointi ja suodatus ratkaisut voidaan ryhmitellä seuraavasti: (Männistö ym. 2006, 48)

- laitekohtainen, ryhmäkohtainen tai keskitetty kompensointi
- pien-, keski- tai suurjänniteverkon kompensointi
- induktiivisen loistehon tai kapasitiivisen loistehon kompensointi
- pelkkä kompensointi tai kompensointi ja yliaaltojen suodattaminen (tai rajoittaminen)
- sarja- tai rinnankytketyt paristot
- passiivi- tai aktiivilaitteet

### 3.4.1 Rinnakkaiskondensaattoriparisto

Rinnakkaiskondensaattoriparisto on tarkoitettu loistehon kompensointiin verkoissa, joissa ei merkittävästi esiinny yliaaltoja. Käytettäessä rinnakkaiskondensaattoriparistoa jännitteen kokonaissärö pitää olla alle 1 %. Rinnakkaiskondensaattoriparisto tarkoittaa kuorman rinnalle kytkettyä paristoa, joka voi olla kiinteä tai säädettävä paristo (kuva 7). Kiinteässä paristossa ei ole mahdollista säätää kondensaattoritehoa. Säädettävässä paristossa säätäminen tapahtuu automaattisesti kytkemällä kondensaattoritehoa portaittain sähköverkkoon. Rinnakkaiskondensaattoriparisto koostuu vaadittavasta määrästä kondensaattoriyksiköitä sekä suojalaitteista. (Männistö ym. 2006, 49; Naskali 2010, 19)



KUVA 7. Rinnakkaiskompensoinnin periaate (Naskali 2010, 19)

Loistehonsäätäjä ohjaa loistehon säätöä kytkemällä kondensaattoriportaita verkkoon tai verkosta pois aseteltujen havahtumisrajojen mukaan sekä induktiiviselle että kapasitiiviselle puolelle. Ohjaus saa tiedon verkon loistehon tarpeesta syötön virtamuuntajalta ja säädin ohjaa kondensaattoriportaita tilanteen mukaan. (Männistö ym. 2006, 50)

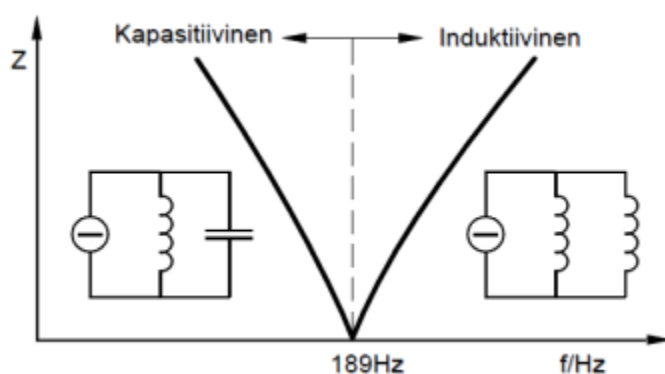
Rinnakkaiskondensaattoriparistoja käytetään joko pää- tai ryhmäkeskuksilla keskitettyyn kompensointiin ja laitekohtaiseen kompensointiin. Keski-jänniteverkkoa kompensoitaessa kondensaattoriparisto liitetään yleensä katkaisijan avulla keskitetysti kiskoon esimerkiksi sähköasemalla. (Männistö ym. 2006, 50)



### 3.4.2 Estokelaparisto

Perinteinen kondensaattoriparisto ei sovellu yliaaltopitoisen verkon perustaajuisen loistehon kompensointiin. Estokelaparistoa suositellaan käytettävän yliaaltopitoisissa verkoissa, kun jännitteen kokonaissärö on yli 3 %. Yliaaltopitoisissa verkoissa kompensointi toteutetaan estokelalla varustetuilla kondensaattoriparistoilla tai yliaaltosuodattimilla. Estokelaparistolla vältetään haitallisten resonanssi tilanteiden syntyminen, jotka ovat rinnakkaiskondensaattoriparistoissa haittana. Kompensointikondensaattorin kapasitanssin ja syötettävän verkon induktanssin saattavat yhdessä muodostaa välilleen rinnakkaisresonanssiin, joka aiheuttaa yliaaltotaajuuden virtasärön vahvistumista jopa 20-kertaiseksi viritystaajuuden osuessa samalle taajuudelle. Resonanssitilanteissa syntyvä virtasärön kasvaminen kasvattaa myös jännitesäröä. (Männistö ym. 2006, 52)

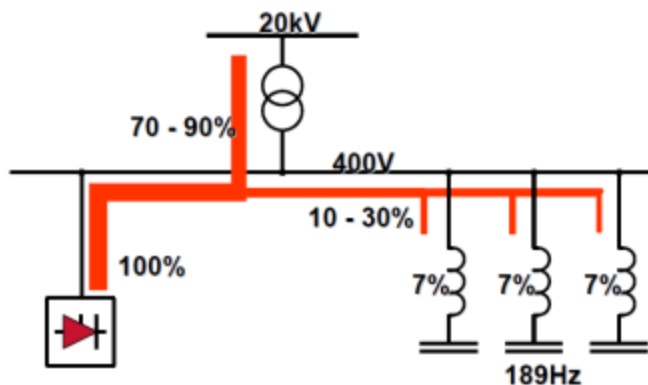
Estokelapariston rakenne koostuu kondensaattorista ja sarjaan kytketystä kuristimesta. Nämä muodostavat sarjassa sarjaresonanssiin, jonka viritystaajuus on viritetty alemmalle taajuudelle kuin verkossa esiintyvä pienin harmoninen yliaaltotaajuus. Estokelapariston viritystaajuuden alapuolella paristo on kapasitiivinen eli tuottaa loistehoa 50 Hz:llä ja viritystaajuuden yläpuolella paristo on induktiivinen, eikä tällöin vahvasta yliaaltoja suuremmilla yliaaltotaajuuksilla (kuva 8). (Männistö ym. 2006, 52–53)



KUVA 8. Estokelapariston impedanssi taajuuden funktiona (Naskali 2010, 23)

Estokelaparisto viritystaajuus mitoitetaan amplitudiltaan suurimpien yliaaltotaajuuksien mukaan. 5. harmoniselle yliaallolle viritystaajuudeksi valitaan 189 Hz. Estokelaparisto kykenee myös suodattamaan 5. harmonisen yliaaltovirran määrästä 10...30 %, kun viritystaajuudeksi on valittu 189 Hz (kuva 9). Suodatuksen määrä riippuu estokelapariston tehosta ja viritystaajuudesta. Suodatus heikkenee, jos viritystaajuus poikkeaa suurim-

masta yliaaltotaajuudesta esimerkiksi 7. harmonisen yliaallon kohdalla. Tämän takia estokelapariston viritystaajuus tulee valita suurimman esiintyvän yliaaltotaajuuden mukaan. (Männistö ym. 2006, 53)



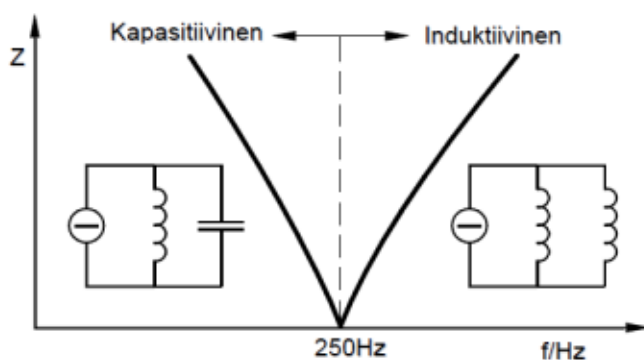
KUVA 9. Estokelapariston toimintaperiaate ja suodatusvaikutus (Naskali 2010, 25)

Estokelaparisto soveltuu yliaaltopitoisten pien- ja keskijänniteverkkojen keskitettyyn loistehonkompensointiin sekä yksittäisten vakiotehoisten laitteiden ja laiteryhmien paikalliseen loistehonkompensointiin. Estokelaparisto kytketään kompensoitavan laitteen rinnalle ja se tuottaa laitteen tarvitseman perustaajuisen loistehon silloin, kun laitetta käytetään eli kytkeytyy päälle ja pois samanaikaisesti kompensoitavan laitteen kanssa. (Männistö ym. 2006, 53–54)

### 3.4.3 Yliaaltosuodatin

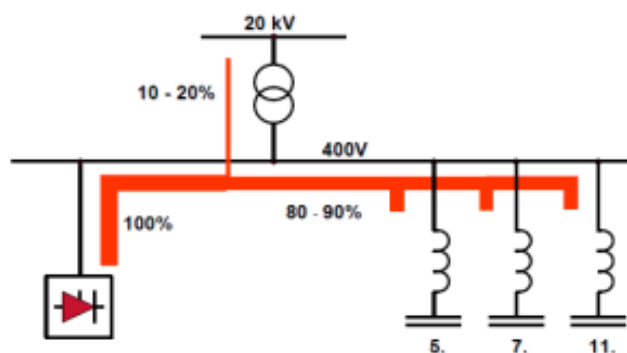
Yliaaltosuodattimia käytetään estokelaparistojen tapaan yliaaltopitoisissa verkoissa loistehon kompensointiin. Yliaaltosuodatinta käytetään yliaaltopitoisissa verkoissa, kun jännitteen kokonaissärö on yli 5 %. Yliaaltosuodatin tuottaa laitteen tarvitseman perustaajuisen loistehon ja suodattaa yliaaltovirtoja verkosta. (Männistö ym. 2006, 55)

Yliaaltosuodattimen rakenne koostuu kondensaattorista ja sarjaan kytketystä kuristimesta. Yliaaltosuodattimen kondensaattorit mitoitetetaan tarvittavan perustaajuisen loistehon tarpeen mukaan, että saavutetaan haluttu kompensointiaste. Kuristimen impedanssi mitoitetetaan yhdessä kondensaattorin kanssa halutulle yliaaltotaajuudelle, että ne yhdessä muodostavat hyvin pieni-impedanssisen sarjaresonanssipiirin, joka imee suurimman osan halutuista yliaalloista suodattimeen (kuva 10). (Männistö ym. 2006, 55)



KUVA 10. 250 Hz yliaaltotaajuudelle viritetyn yliaaltosuodattimen impedanssi taajuuden funktiona (Naskali 2010, 27)

Jokaiselle yliaaltotaajuudelle viritetään oma sarjaresonanssiipiiri, joka imee tietyn taajuiset yliaallot suodattimeen. Tyypillisimmin yliaaltosuodatin on viritetty 5., 7. ja 11. harmoniselle yliaallolle eli viritystaajuuksien ovat 250 Hz, 350 Hz ja 550 Hz (kuva 11). (Männistö ym. 2006, 55)



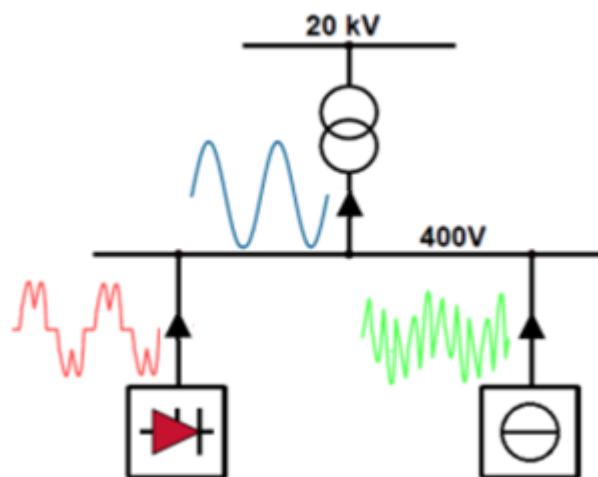
KUVA 11. Yliaaltosuodattimen toimintaperiaate ja suodatusvaikutus (Naskali 2010, 30)

Yliaaltosuodatin soveltuu yliaaltopitoisten pien- ja keskijänniteverkkojen keskitettyyn loistehonkompensointiin. Yliaaltopitoisen verkon tila ja käyttäytyminen on tunnettava käytettäessä yliaaltosuodattimia. (Männistö ym. 2006, 55)

### 3.4.4 Aktiivisuodatin

Estokelaparistojen ja yliaaltosuodattimien rinnalle ovat tulleet aktiivisuodattimet. Passiivisilla komponenteilla toteutetut suodattimet eivät kykene suodattamaan verkossa tapahtuvia muuttuvia yliaaltotilanteita, vaan suodattavat ennalta määritetyt yliaallot. Puolijohdetekniikalla toteutetut aktiivisuodattimet mittaavat virran yliaaltokomponentit

ja tuottavat vastakkaisen  $180^\circ$ :n vaihesiirrossa olevan virran verkkoon, joka summautuu yliaaltolähteen ottamaan virtaan, joten verkon virta näyttää sinimuotoiselta verkkovirrasta (kuva 12). (Männistö ym. 2006, 62)



KUVA 12. Aktiivisuodattimen toimintaperiaate (Naskali 2010, 31; Männistö ym. 2006, 63)

Aktiivisuodatin on ohjattu virtalähde, jonka invertteri tuottaa PWM-modulaatiolla halutun virran verkkoon ja energialähteenä toimivat kompensoitavan verkon lataamat tasajännitekondensaattorit. Invertteri koostuu puolijohdekomponenteista ja toimii samalla periaatteella kuin taajuusmuuttajakin. (Männistö ym. 2006, 62)

Aktiivisuodattimella on paljon etuja ja sen käyttöä voidaan säädellä eri tilanteissa. Aktiivisuodattimella on mahdollisuus tuottaa useita suodatettavia taajuuksia, mahdollisuus suodatukseen ilman loistehon tuottamista, rinnakkaisresonanssin välttäminen ja pienempi tilan tarve. Aktiivisuodatin on tekniikkansa puolesta vielä kallis ratkaisu verrattessa passiivisuotimiin, mutta pystyy paremmin parantamaan sähkön laatua muuttuvissa kuormitustilanteissa. (Männistö ym. 2006, 62)

Aktiivisuodatin voidaan vapaammin kytkeä mihin tahansa verkon pisteeseen, kuin esto-  
kelaparistot ja yliaaltosuodattimet. Kuitenkin on järkevää ja kustannustehokkainta asentaa aktiivisuodatin lähelle laitetta, joka aiheuttaa yliaaltoja verkkoon. Aktiivisuodatin on hyvin mukautuvainen kompensoitavan virran suuntaan, käyrämuotoon, vaihesiirtoon, epäsymmetriaan ja virtamuutoksen dynamiikkaan. Aktiivisuodatin on riippumaton jännitteen laadusta ja verkon impedanssista. (Männistö ym. 2006, 62)

### 3.4.5 Tyristorikytetty kondensaattoriparisto ja kompensattori

Nopeasti tapahtuvissa kuormitus muutoksissa vaaditaan myös nopeasti tapahtuvia kompensointitehon muutoksia, joihin ei normaaleilla kytkinlaitteilla päästä. Nopean ohjauksen mahdollistavat tyristorikytkimet, joita käytetään kondensaattoriparistojen ja kompensattoreiden kytkennässä. Tyristorikytkimissä ei tapahdu mekaanista kulumista ja ne mahdollistavat transienttivapaan kytkennän. Tyristorikytettyjä kondensaattoriparistoja (TSC) käytetään pienjänniteverkoissa nopeasti tapahtuviin kytkentöihin. Tyristoriohjustusta reaktorista (TCR) ja yliaaltosuodattimista koostuvaa kompensattoria käytetään suurjänniteverkoissa. Tyristoriohjaus mahdollistaa kompensointitehon portaattoman säädön. Tyristoriohjauksen ansiosta loistehon kompensointi voidaan suorittaa lähes viiveettömästi. Pariston jokainen porras saadaan kytketty verkkoon minimissään yhden verkkojakson aikana. (Männistö ym. 2006, 60)

### 3.4.6 Staattinen kompensattori

Staattinen kompensattori (SVC) soveltuu sähköverkon ja teollisuuden kompensointiin nopeasti tapahtuvissa muutoksissa. Staattinen kompensattori tuottaa halutun loistehon ja suodattaa halutut yliaallot sekä myös tasaa jännitteen nopeissa kuormitus muutoksissa, joita esimerkiksi valokaariuuni aiheuttaa. Laitteisto kykenee maksimissaan 10 ms kokonaisvasteaikaan. (Männistö ym. 2006, 60)

### 3.4.7 Kytkin- ja suojalaitteet

Kompensointilaitteiden kytkemisessä pienjänniteverkkoon on käytettävä vähintään sulakkeita ja suositeltavaa huollon kannalta on käyttää kytkinvarokkeita tai kompaktikatkaisijaa. Keskijänniteverkkoon kytkettäessä kompensointilaitteiston liitäntälaitteena on käytettävä tehon, kytkentätarpeen ja kapasitiivisen virran katkaisukyvyyn mukaan joko erotinta, kuormaerotinta tai katkaisijaa. Kondensaattoriparistojen aiheuttamia kytkentäilmiöitä rajoitetaan käyttämällä vaimennusvastusta tai -kelaa, jolla kondensaattori ensin kytketään verkkoon ja hetkenkuluttua ne ohitetaan rinnalle kytketyllä katkaisijalla. Tai vaihtoehtoisesti käytössä on 0-pisteen katkaisija, jolla kunkin vaiheen kytkentä pyritään tekemään jännitteen nollakohdassa. (Männistö ym. 2006, 64)

Pienjänniteverkossa kondensaattoriparistojen ylivirta- ja oikosulkusuojana käytetään yleensä sulakesuojauksia ja mahdollista on käyttää myös ylivirtareleitä tai vastaavia. Keskijänniteverkossa kondensaattoriparistojen oikosulku- ja ylijännitesuojauksessa käytetään suojareleitä. Lisäsuojana käytössä on kondensaattoriparistojen sisäinen epäbalanssisuojaus. Tapauskohtaisesti laitteita voidaan varustaa myös erilaisilla lisäsuojalaitteilla. (Männistö ym. 2006, 64)

### 3.5 Kompensointilaitteiden mitoitus

Kompensointilaitteiden mitoituksen lähtökohtana on tietää sähkökäyttäjän verkon kompensoinnin tarve. Lisäksi täytyy tietää verkon yliaaltotilanne jännitteen- ja virransäron osalta, jos käytössä epälineaarista kuormitusta. Kompensoitavasta verkosta on syytä tehdä pitkäaikaismittaukset sähkönlaatu- ja häiriöanalyysaattorilla, että pystytään mitoittamaan oikeanlainen kompensointiratkaisu kyseisen verkon tarpeisiin. Lähtökohtaisesti mitoituksessa tarvitaan seuraavat tiedot: (Männistö ym. 2006, 94)

- Verkkotiedot
- Verkon nimellis- ja käyttöjännite
- Tarvittava perustaaajuinen loisteho ( $Q/kvar$ )
- Ympäristöolosuhteet
- Asennustilan tiedot
- Nykyinen kompensointi
- Loistehon laskutus
- Verkkokäskytyjärjestelmän käyttö
- Yliaaltotilanne (jännitesäro)

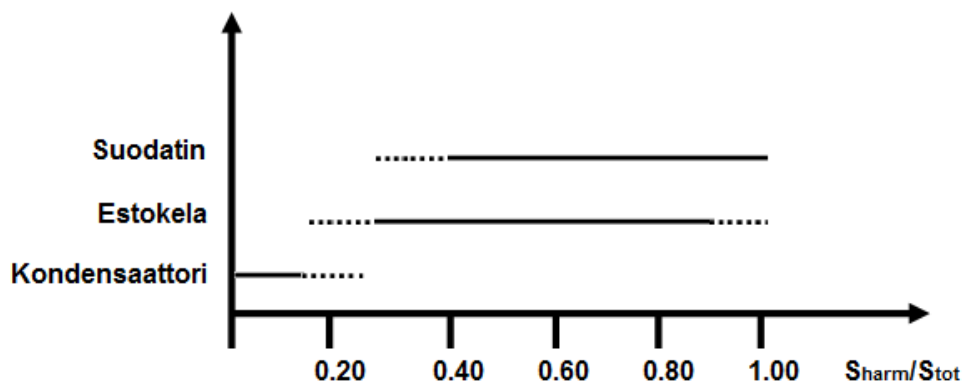
Yliaaltopitoisesta verkosta pitää lisäksi tietää seuraavat tiedot yliaaltojen suodatusta varten: (Männistö ym. 2006, 94)

- Yliaaltovirrat
- Kuorman tyyppi (teho ja suuntaajien pulssiluku)
- Suodatuksen tarve (tavoite-/maksimijännitesäro ja yliaaltovirrat)
- Verkon oikosulkuteho

### 3.6 Kompensointilaitteiden valinta

Kompensointilaitteiden valintaa vaikuttaa verkon yliaaltopitoisuus (kuva 13). Yliaaltopitoisuuden ollessa vähäinen eli yliaaltoja tuottavan kuorman osuus kokonaiskuormasta on alle 15...20 %, kompensointi voidaan suorittaa rinnakkaiskondensaattoriparistoilla hajautetusti tai keskitetysti. Kompensointi voi olla kiinteä tai säädettävä. Yliaaltopitoisuus on hyvä selvittää mittaamalla ennen laitteiston valintaa. (Männistö ym. 2006, 97)

Yliaaltopitoisemmissa verkoissa pelkän kondensaattorin käyttäminen kompensoinnissa saattaa johtaa resonanssi-ilmiöihin ja tätä kautta yliaaltojen vahvistumiseen. Tällöin on tarve suorittaa kompensointi estokelaparistolla. Yliaaltopitoisuus saattaa nousta estokelaparistolle liian suureksi, niin silloin on käytettävä yliaaltojen suodattamiseen yliaaltosuodattimia tai aktiivisuodattimia. Aktiivisuodattimet ovat kalliita ratkaisuja, jolloin on syytä harkita aktiivisuodattimen rinnalle rinnakkaiskondensaattori-, estokela- tai suodatinparistoa perustaajuisen loistehon tuottamiseen. Tällöin aktiivisuodatin kompensoi ainoastaan yliaaltoja. Näin päästään teknistaloudellisesti kannattavampaan kokonaisratkaisuun. (Männistö ym. 2006, 97–98)



KUVA 13. Kompensointilaitteiden valinta verkon yliaaltopitoisuuden mukaan (Männistö ym. 2006, 98)

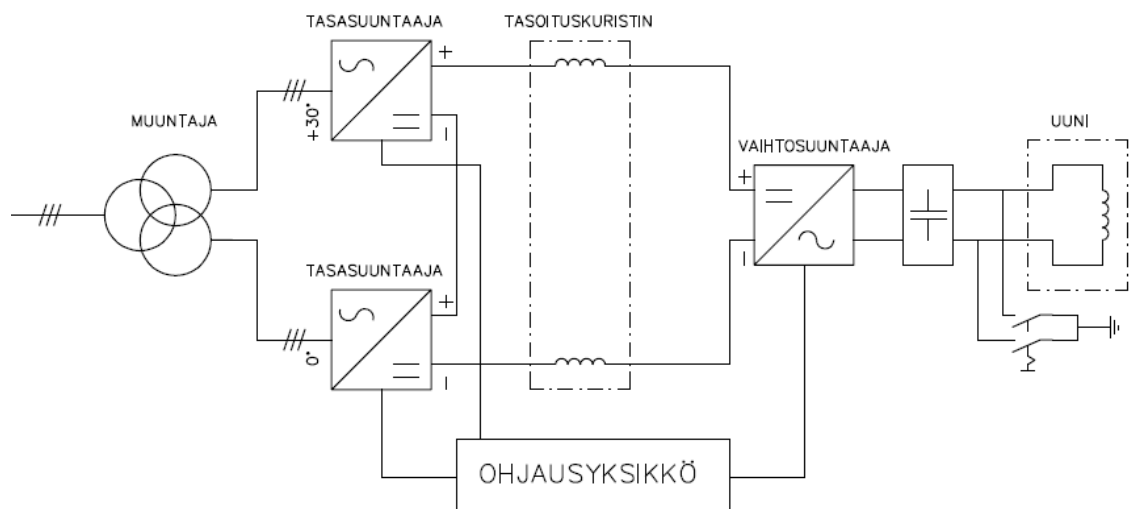
## 4 INDUKTIOUUNI

### 4.1 Käyttö ja toiminta

Induktiouunia käytetään valimossa metallin sulatukseen. Uuni on tyypiltään induktioupokasuuni. Induktiouunissa sähköenergia muutetaan induktion avulla lämpöenergiaksi uunin sisällä olevaan panokseen. Metallin sulatus perustuu pyörrevirtoja, jotka aikaan saadaan johtamalla vaihtovirtaa uunin ympärillä kulkevaan kuparikäämitykseen, joka indusoi pyörrevirrat metallipanokseen. Pyörrevirrat kuumentavat ja lopulta sulattavat panoksen. Pyörrevirrat aikaansaavat tasaisen koostumuksen ja lämpötila saadaan säädettyä halutuksi. Jos uuni on tyhjä, sitä ei voida kuumentaa. (Keskinen & Niemi 2011, 3)

### 4.2 Laitteisto

Induktiouuni laitteisto pitää sisällään paljon erilaisia sähköisiä laitteita ja komponentteja (kuva 14). Laitteisto tarvitsee oman muuntajan, jolla induktiouunin laitteisto liitetään keskijänniteverkkoon. Laitteisto sisältää tasasuuntaajan, tasoituskuristin ja vaihtosuuntaajan, joilla kolmivaiheinen verkkojännite muutetaan yksivaiheiseksi ja suuritajuiseksi jännitteeksi induktiouunin kelalle. (ABP Induction 2011)



KUVA 14. Induktiouunin laitteisto (ABP Induction 2011)



Laitteistossa syntyy paljon lämpöä, erityisesti induktiounin upokkaassa. Laitteisto tarvitsee myös jäähdytyksen, sillä komponentit eivät kestäisi muuten käyttöä. Induktiounin upokkaan kuparikäämitys on sisältä ontto ja siellä kiertää jäähdytys vesi. Jäähdytysvesi on välttämätön, koska sulan metallin lämpötila on yli 1500 °C ja kuparikäämitys ei kestäisi, ellei käytettäisi jäähdytysvettä. Uunin lisäksi vesijäähdytys on myös tasasuuntaajassa, tasoituskuristimessa, vaihtosuuntaajassa ja uunin värähtelypiirin kondensaattoreissa. Tehoelektroniikan komponentit tuottavat paljon lämpöhäviöitä, siksi niitä on jäähdytettävä vedellä. Sähkötilan lämpötilakin saadaan pidettyä vakaana, koska komponenttien lämpöhäviöt ei turhaan lämmitä sähkötilaa vesijäähdytyksen ansiosta. Toisaalta vesijäähdytyksellä on omat vaaratkin vikatilanteissa, sillä vesi ja sähkö eivät ole hyvä yhdistelmä.

#### **4.2.1 Muuntaja**

Nimellisteholtaan 2x740 kVA:n muuntaja on liitetty 6 kV keskijänniteverkkoon. Muuntaja on tyypiltään kolmikäämimuuntaja, jossa on yksi ensiökäämitys ja kaksi toisiokäämitystä 535 V jännitteellä. Toisessa muuntajan toisiokäämissä käytetään Y-kytkentää ja toisessa D-kytkentää. Tämä mahdollistaa sen, että järjestelemien jännitteiden välille syntyy 30° vaihe-erokulma. Kytkentä on käytössä isotehoisissa järjestelmissä, jolla saadaan pienennettyä verkon yliaaltorasitusta ja harmonisia säröjä. Muuntajan perään on kytketty kaksi 6-pulssisiltaa sarjaan. (ABP Induction 2011)

#### **4.2.2 Tasasuuntaussilta**

Tasasuuntaus toteutetaan kahdella sarjaan kytketyllä 6-pulssisella täysin ohjatulla tyristorisillalla. Muuntajan syöttäessä kahta 6-pulssista tyristorisiltaa keskenään 30° vaihe-erossa olevalla syöttöjännitteellä, on toteutus 12-pulssinen täysin ohjattu tyristorisilta. Kolmikäämimuuntajan ja kahden tasasuuntaussillan verkkokytkennällä saadaan pienennettyä verkon yliaaltorasitusta ja harmonisen särön syntymistä. 12-pulssisillalla pystytään rajoittamaan hyvin harmonisten yliaaltojen syntymistä ja ensimmäiset isoimmat yliaaltovirrat ovat vasta 11. ja 13. yliaalto. 12-pulssisilta kumoaa 5., 7., 17. ja 19. yliaal-

lot poistuvat. Tasasuuntaajassa ei säädetä uuni tehoa, vaan tehon säätäminen suoritetaan vaihtosuuntaajassa. (ABP Induction 2011; Elovaara & Haarla 2011, 321–322)

#### **4.2.3 Tasoituskuristin**

Tasa- ja vaihtosuuntaajan välillä välijännitepiiriin on kytketty tasoituskuristin. Tasoituskuristin tasoittaa välijännitepiirissä virran muutoksia. Lisäksi tehtävänä on kytkeä erilleen induktiuunin kelan suuritaajuinen jännite muusta sähköverkosta. (ABP Induction 2011)

#### **4.2.4 Vaihtosuuntaaja**

Tasajännite muutetaan vaihtosuuntaajassa yksivaiheiseksi vaihtojännitteeksi. Vaihtosuuntaajassa toteutetaan myös jännitteen taajuuden nostaminen keskitaajuiseksi jännitteeksi. Nimellisjännite on 1799 V ja nimellistaajuus on 436 Hz. Tehon ohjaus tapahtuu vaihtosuuntaajassa ohjauskulman avulla. (ABP Induction 2011)

#### **4.2.5 Uuni ja kondensaattorit**

Vaihtosuuntaaja syöttää yksivaiheista ja keskitaajuisia jännitettä uunin kelaan. Uunin kelan kanssa rinnalla on kondensaattoriparisto, jotka yhdessä muodostavat resonanssi-piirin. Kondensaattori tuottaa tarvittavan loistehon induktiokelalle ja vaihtosuuntaajalta otettava teho on vain pätötehoa. Resonanssi-piirin ominaistaajuuden määrittää induktiokelan induktanssi ja kondensaattorin kapasitanssi. Kondensaattorin kapasitanssi pysyy vakiona, mutta induktiokelan induktanssi muuttuu kuumennettavan materiaalin vastuksen, lämpötilan, täyttömäärän, kytkennän ja permeabiliteetin mukaan, joten rinnakkaisvärähtelypiirin ominaistaajuus ei pysy vakiona. (ABP Induction 2011)

#### **4.2.6 Käynnistyslaite**

Käynnistyslaite käynnistää uunin värähtelyn käynnistystilanteessa. Aputasasuuntaajaa lataa käynnistyskondensaattorin täyteen laitteiston ollessa pois päältä. Induktiouunin käynnistyksessä käynnistyskondensaattorin varaus purkautuu käynnistystyristorin kautta kuormapiiriin. Induktiokelassa alkaa värähdellä käynnistyskondensaattorin purkautumisen vaikutuksesta. Ohjauslogiikka havaitsee jo ensimmäisen puolisaallon ja lähettää sytytyspulssin vaihtosuuntaajan tyristoreille. Välipiirin virta nousee samanaikaisesti käynnistyspulssin mukaan ja uunin käyttö voidaan aloittaa. (ABP Induction 2011)

## 5 SÄHKÖN LAADUN MITTAUS JA TULOSTEN ANALYSOINTI

### 5.1 Lähtökohta

Valkeakosken Metso Paper Oy:n Terätehtaalle on käyttöön otettu keväällä 2011 uusi 1230 kW:n induktiouuni. Induktiouuni laitteisto on liitetty 6 kV:n keskijänniteverkkoon kolmikäämimuuntajalla.

Lähtökohtaisesti on tiedossa induktiouuni-laitteiston olevan epälineaarinen ja induktiivinen kuormitus. Laitteistolla ei vielä ole minkäänlaista kompensointia, joten on syytä olettaa, että laitteistolla saattaa aiheuttaa haitallisia verkkovaikutuksia ainakin loistehon ja yliaaltojen osalta.

Elokuussa 2011 induktiouunille suoritettiin sähkönlaatu mittaukset verkkoanalysaattorilla. Mittauksien tarkoituksena on määrittää kuormituksen aiheuttamat verkkovaikutukset loistehon ja yliaaltojen osalta. Mittaustulokset on lähtökohtana mahdollisen kompensointi- ja suodatinlaitteiston tarpeen määrittämisessä.

### 5.2 Mittaustapa

Sähkön laadun mittauksessa tulisi noudattaa samaa mittausmenetelmää, jolla standardissa SFS-EN 50106 määrittää vaatimukset jännitteelle. Mittauksen kesto tulee olla riittävän pitkä, että kaikki käyttötilanteet saadaan mitattua. Standardi SFS-EN 50106 suosittelee jännitemittauksia tehtäessä mittausajanjaksoksi yhtä viikkoa normaaleissa käyttöolosuhteissa. Mittari suorittaa mittaukset 10 minuutin mittausjaksoissa ja tästä saadaan kunkin mittaus suuren tehollisarvon keskiarvo tulokseksi. Mittaustulos muodostuu 10 minuutin mittausjaksoista viikon ajalta. (Männistö ym. 2006, 46)

Sähkö laatu mittaukset suoritetaan sähkönlaatu- ja häiriöanalysaattorilla pitkäaikaismittauksena. Käytettävä mittalaite on Dranetz 4300 -verkkoanalysaattori. Verkkoanalysaattori on tarkoitettu kolmivaiheisen verkon kuormitusten mittaamiseen. Neljällä erillisellä virran mittaukseen tarkoitettulla kanavalla sekä neljällä erillisellä jännitteen mittaus kanavalla saadaan verkkoanalysaattorilla mitattu sähkön laadun perus suureita, kuten esi-

merkiksi eri tehoja sekä jännitteen ja virran säröytymistä. Mittaustulokset saadaan verkkoanalysaattorista tietokoneelle ja niitä pystytään siten analysoimaan. (Dranetz BMI PP4300 Data Sheet)

### 5.3 Mittaaminen

Mittauksen tarkoituksena on mitata verkkoanalysaattorilla induktiouunin sähköverkosta ottamaa sähkön laatua ja sähköverkkoon päin aiheuttamia häiriöitä. Mittaus suoritettiin induktiouunin 6 kV:n keskijänniteverkkoon lähdöstä virtamuuntajien takaa. On järkevintä suorittaa mittaukset induktiouunin lähdöstä, koska silloin nähdään induktiouunin aiheuttamat vaikutukset muuhun sähköverkkoon. Mittaus oli kestoltaan noin viikon ja sillä ajanjaksolla sai hyvän kuvan induktiouunin normaaleista käyttötilanteista ja käyttösykleistä. Verkkoanalysaattori kerää mittaustietoa 10 minuutin näytteenottojakson ajan ja laskee tästä 10 minuutin keskiarvon. Näistä muodostuu viikonmittaisella mittausjaksolla tulokset jännitteestä, virroista, tehoista, yliaalloista ja muista häiriöistä. Mittaustulokset saadaan puretuksi verkkoanalysaattorilta tietokoneelle ja tuloksia voidaan tarkastella aikatasolla.

### 5.4 Mittaustulosten käsittely

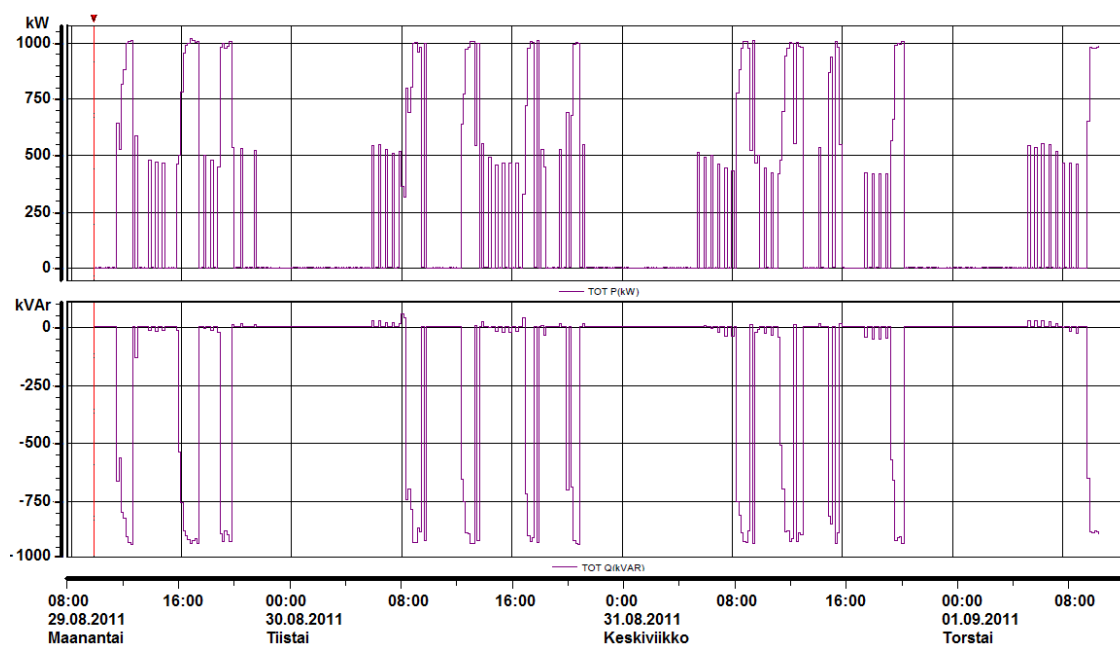
Elokuussa 2011 Tampereen Veran suorittamista sähkönlaatumittauksista saatiin paljon mittaustietoa, jonka perusteella voidaan selvittää induktiouunin aiheuttamia verkkovaiikutuksia. Mittaustietoa kertyi paljon erilaisista sähköisistä suureista viikon mittausjakson ajalta. Mittaustietoa kootaan graafiset mittaustulokset ja taulukot eri sähköisille suureille. Graafisissa mittaustuloksissa sähköiset suuret on esitetty ajan suhteessa. Graafisten mittaustulokset suuret on esitetty 10 minuutin keskiarvoina, koska verkkoanalysaattori suoritti 10 minuutin näytteenottojaksoja. Hetkellisiä nopeita muutoksia ei siis havaita mittaustuloksista, koska liipaisutoiminto ei ollut käytössä verkkoanalysaattoris- sa. Näin saadaan paras kuvaus induktiouunin kuormituksesta ja sen vaihteluista sekä aiheutuvista verkkovaiikutuksista. Mittaustuloksissa esitetään induktiouunin käytön aiheuttamat vaikutukset 6 kV:n keskijänniteverkon lähdössä. Seuraavaksi esitellään merkittävämmät mittaustulokset induktiouunin ja muun sähköverkon kannalta. Mittausjakso oli kestoltaan viikon mittainen ja alla esitettävät mittaustulokset ovat otos siitä kolmen

vuorokauden ajalta. Mittaustuloksista käy hyvin ilmi induktiuunin käyttö ja sen seurauksena syntyvät verkkovaikutukset.

#### 5.4.1 Tehot

Induktiounin kuormitus sykli on parhaiten havaittavissa tehon kuvista ajan suhteessa. Alla esitetyissä kuvissa on induktiounin 6 kV:n verkosta ottamat pätö- ja loistehot. Esitetyt tehot ovat kokonaispätö- ja kokonaisloistehoja eli ne sisältävät myös yliaaltojen aiheuttaman tehon. Pätötehon kuvasta havaitaan induktiounin kuormitus sykli, joka sisältää lämmityksen pätökissä ja sitä seuraavan sulatuksen, jolloin otetaan suurin teho. Sulatuksen aikana pätötehon nähdään kasvavan portaittain ja tämä johtuu pyörrevirtojen vaikutuksesta metallipanokseen. Pyörrevirrat aluksi kuumentavat metallipanosta, ja metallipanosa alkaa sulaa. Sulaneesta metallipanoksesta muodostuu yhtenäinen koostumus, jolloin induktiouni ottaa suurimman tehonsa.

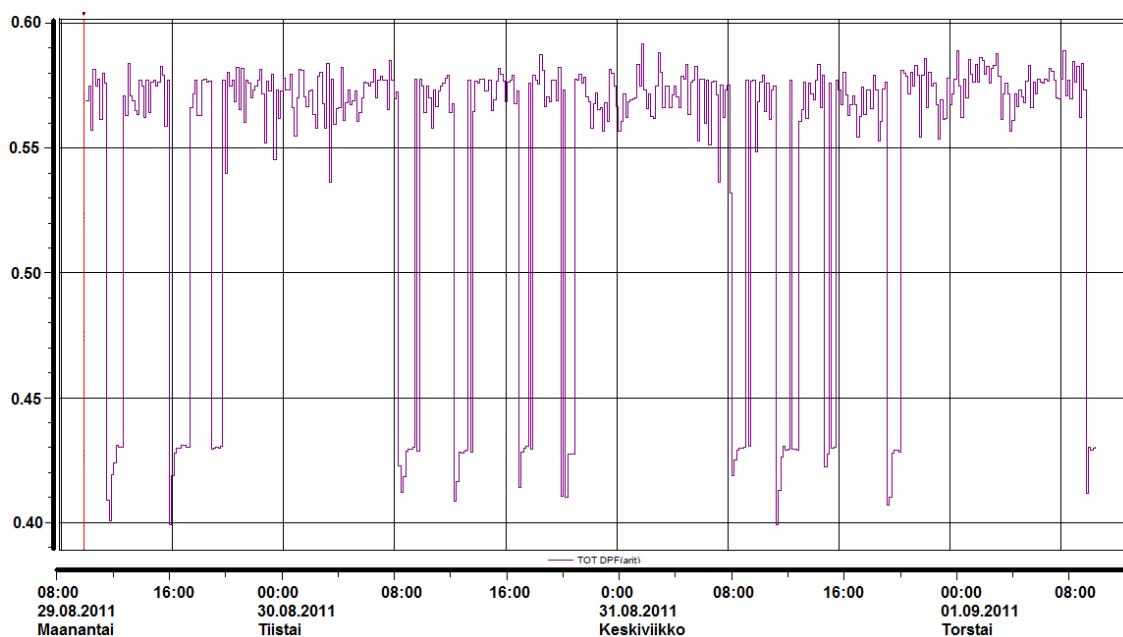
Nimellisteholtaan induktiouni on 1230 kW. Graafisista kuvaajista havaitaan induktiounin ottavan kokonaispätötehoa suurimmillaan 1020 kW verkosta, sekä samalla hetkellä tuottavan kokonaisloistehoa -927 kVAr (kuva 15). Kokonaisnäennäisteho on tällöin 1382 kVA ja kokonaistehokerroin PF on kapasitiivisella -0,74, joka pitää sisällään yliaaltojen vaikutuksen. Yliaallot saavat kuorma näyttämään verkkoon päin kapasitiivisena kuormituksena. Yliaallot siis tuottavat muuhun verkkoon kokonaisloistehoa.



KUVA 15. Kokonaispätötehon ja -loistehon suhde (Ketola 2011)

#### 5.4.2 Perusaallon tehokerroin

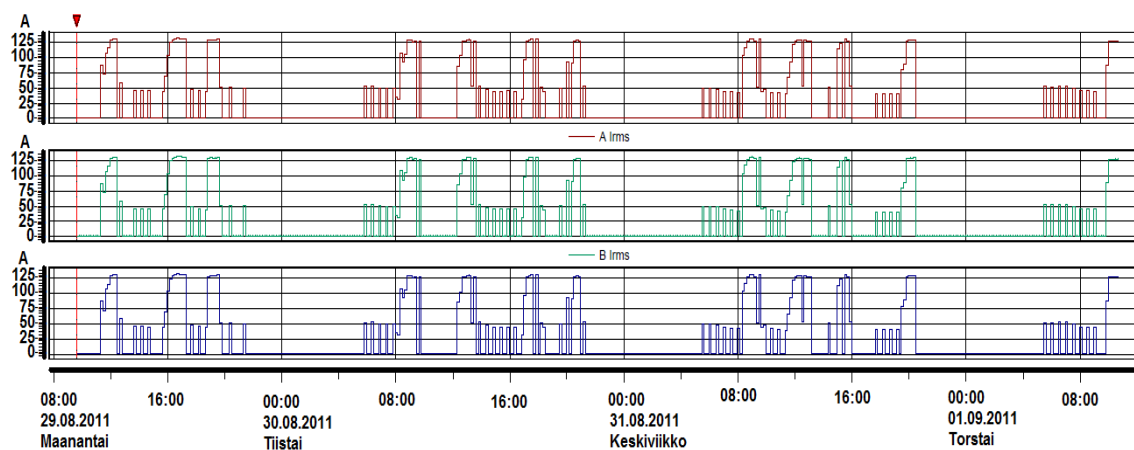
Perusaallon tehokerroin DPF saadaan perustaajuisen pätötehon ja perustaajuisen näennäistehon suhteesta (kuva 16). Perusaallon tehokerroin on induktiivisella 0,40...0,59, joka on hyvin erilainen kokonaistehokertoimeen verrattuna. Kuormitushetkellä perusaallon tehokerroin on induktiivisella 0,40...0,43. Muuna aikana perusaallon tehokerroin on induktiivisella 0,54...0,59, jolloin kuormana ovat pelkästään syöttökaapeli ja muuntajan tyhjäkäyntihäviöt. Perusaallon tehokertoimessa merkittävin on kuormitushetken tehokerroin. Perusaallon tehokerroin on induktiivinen ja näin ollen induktiouuni ottaa verkosta perustaajuisia loistehoa. Perustaajuinen loisteho on määräävä tekijä loistehon laskutuksen kannalta.



KUVA 16. Perusaallon tehokerroin (Ketola 2011)

### 5.4.3 Kuormitusvirta

Induktiouunin kuormitusvirran syklit ovat vastaavanlaiset, kuin kokonaispätötehon syklit kuormituksissa. 6 kV:n lähdestä mitattu vaihekohtainen kuormitusvirta on suurimmalla kuormituksella noin 130 A vaihetta kohden, joka pitää sisällään myös yliaaltovirrat (kuva 17).

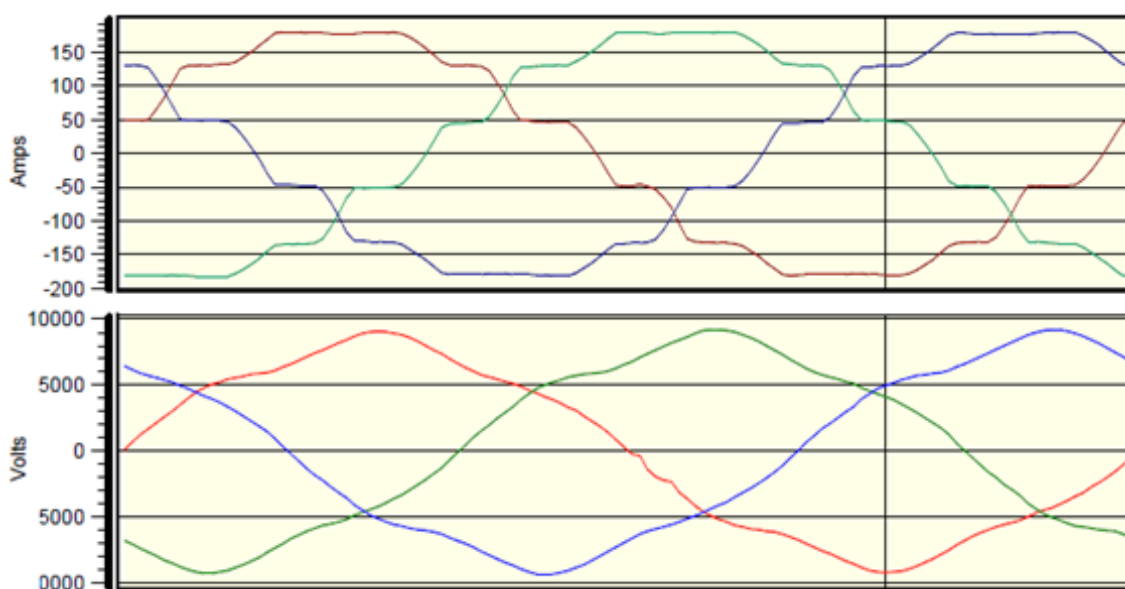


KUVA 17. Kuormitusvirrat (Ketola 2011)



#### 5.4.4 Virran ja jännitteen aaltomuodot

Virran ja jännitteen aaltomuodon kuva on otettu 6 kV:n verkosta tilanteessa, jossa induktiouunilla on suurin kuormitus päällä (kuva 18). Virran ja jännitteen aaltomuodon kuvista havaitaan, etteivät virta ja jännite ole aivan nimellistaajuutta vastaavan sinikäyrän muotoiset, vaan aaltomuodoissa on havaittavissa selvästi säröytymistä. Säröytymän selvittämiseksi aaltomuodoille voidaan suorittaa Fourier-muunnos, josta saadaan selville yliaaltovirrat ja -jännitteet. Aaltomuotoja vertaillessa havaitaan virran olevan jännitettä edellä, jolloin kuorma näyttää kapasitiiviseltä. Kuorma siis tuottaa verkkoon loistehoa yliaaltojen takia.



KUVA 18. Virran ja jännitteen aaltomuodot kuormitushetkellä (Ketola 2011)

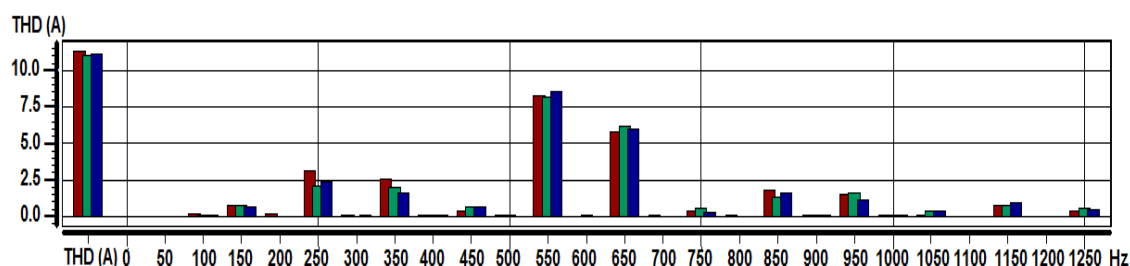
#### 5.4.5 Virran ja jännitteen aaltomuodon yliaallot

Virran ja jännitteen aaltomuodon havaittiin poikkeavan sinimuodosta, jolloin on syytä tehdä tarkempia tutkimuksia ja määrittää aaltomuodosta eritaajuiset virran ja jännitteen komponentit. Aaltomuodon tarkempaa tutkimista varten käytetään Fourier-analyysia, joka matemaattisesti jakaa aaltomuodon funktion eritaajuisiin komponentteihin. Tuloksena saadaan aaltomuotojen yliaaltosisältö virralle ja jännitteelle.

Virran aaltomuodolle suoritetaan Fourier-analyysi ja tuloksena saadaan harmonisten yliaaltovirtojen suuruus absoluuttisina arvoina suhteessa virran perusaaltoon (kuva 19).

Ensimmäiset suurimmat yliaaltovirrat ovat 11. (550 Hz) ja 13. (650 Hz) yliaalto. 11. yliaalto on noin 8 A ja 13. yliaallolla on noin 6 A. Vastaavasti 5., 7., 17. ja 19. yliaalto ovat 1...3 A välillä. Virran harmoninen kokonaissärö on absoluuttisina arvoina noin 11 A ja suhteellinen arvo noin 8,4 %. Puolestaan 11. yliaalto on noin 6,1 % ja 13. yliaalto on noin 4,6 %.

12-pulssisillan lainalaisuudet tulevat hyvin esiin yliaaltovirroissa, sillä 5., 7., 17. ja 19. yliaalto ovat hyvin pienet ja ensimmäiset merkittävät yliaaltovirrat ovat 11. ja 13. yliaalto.



KUVA 19. Virran aaltomuodon harmoniset yliaaltovirrat ampeereina (Ketola 2011)

Alla on esitetty virran harmoninen kokonaissärö absoluuttisina arvoina eli ampeereina ja suhteellisina arvoina eli prosentteina suurimmalla kuormituksella (taulukko 4).

TAULUKKO 4. Virran harmoninen kokonaissärö ampeereina ja prosentteina

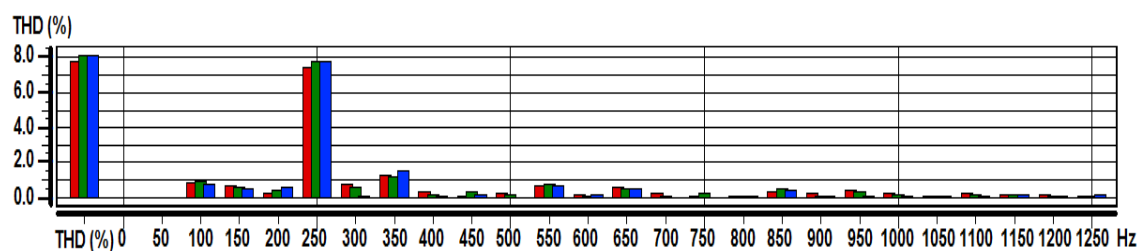
	$I_A$	$I_B$	$I_C$
$I_{rms}$ (A)	132	133	132
$THD_1$ (A)	11,3	11	11,2
$THD_1$ (%)	8,5	8,1	8,4

Jännitteen aaltomuodolle suoritetaan Fourier-analyysi ja tuloksena saadaan harmonisten yliaaltojännitteiden suuruus prosentteina suhteessa perustaajuiseen komponenttiin ja kokonaissärö (kuva 20). Yliaaltojännitteet saadaan 25 ensimmäiselle harmoniselle yliaallolle.

Yksittäinen suurin jännitesärö 5. yliaalto (250 Hz) on vajaa 8 %. Muita yliaaltoja ei merkittävästi esiinny. Jännitteen kokonaissärö on noin 8 %. Jännitteen kokonaissärö on standardin rajoissa, sillä standardi määrittää rajaksi 8 %. Standardi määrittelee 5. yliaal-

lon jännitesärön rajaksi 6 %, eli tämä ylitetään. Senerin määrittelemiin sähkön laatu-  
luokkiin ei kyseisellä jännitteelle päästä.

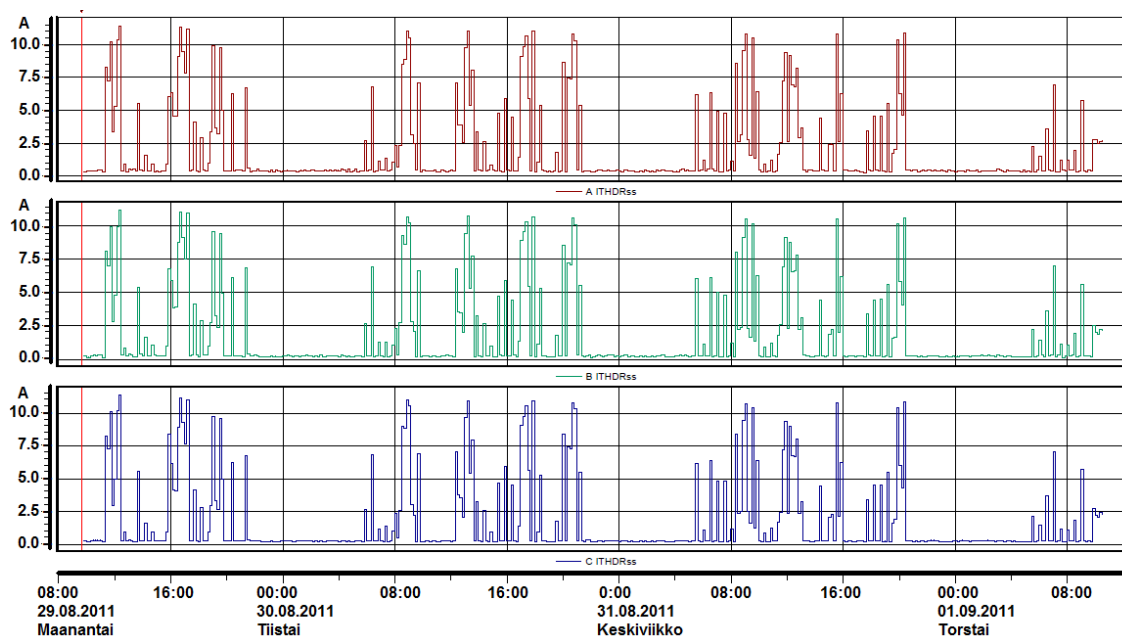
Induktiouunin tuottamat yliaaltovirrat eivät näytä merkittävästi vaikuttavan jännitteen yliaaltokomponentteihin. Merkittävimmät yliaaltovirrat olivat 11. ja 13. yliaalto, ja yliaaltojännitteistä havaitaan, etteivät merkittävimmät yliaaltovirrat aiheuta juurikaan jännitteen säröytymistä 11. ja 13. yliaallolla. Esiintyvä 5. yliaaltojännite ei vaikuttaisi syntyvän induktiouunista aiheutuvien yliaaltovirtojen seurauksena, koska 5. yliaaltovirtaa ei juuri paljoa esiinny.



KUVA 20. Jännitteen aaltomuodon harmoniset yliaaltojännitteet suhteessa perusaaltoon (Ketola 2011)

#### 5.4.6 Virtasärö

Virran kokonaissärö ampeereina muuttuu kuormituksen mukaisesti (kuva 21). Pienellä kuormituksella virtasärö on vähäistä ja suurimmalla kuormituksella virtasärö nousee noin 11:sta A:n, joka on suhteellisen kokonaissärönä noin 8,5 %.

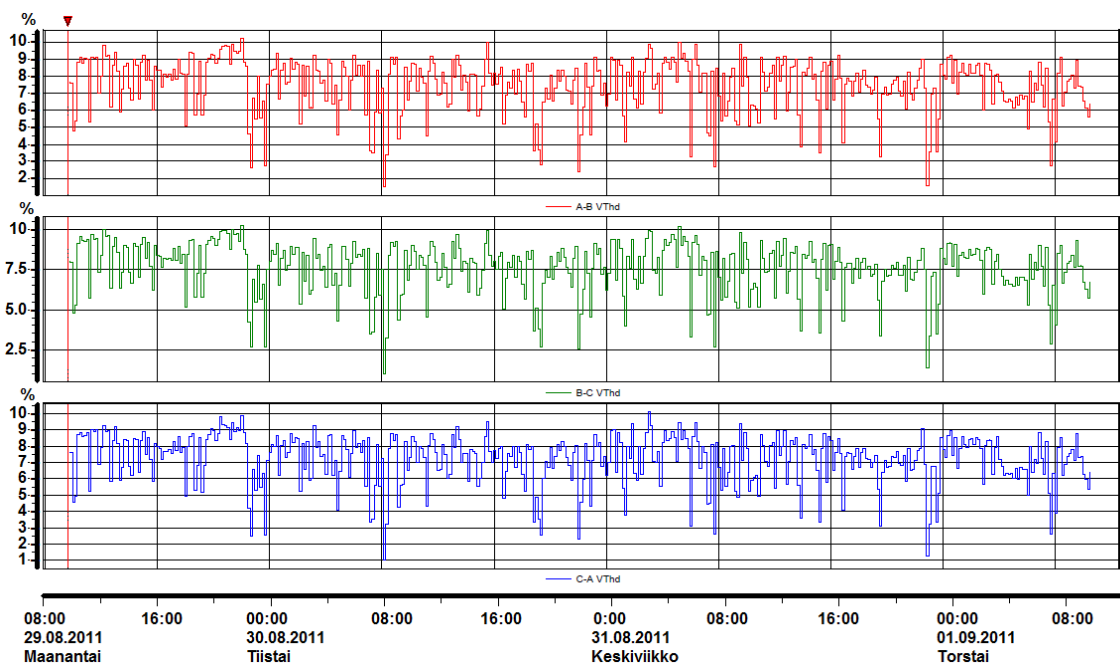


KUVA 21. Virtasärö ampeereina (Ketola 2011)

#### 5.4.7 Jännitesärö

Jännitteen kokonaissärön muutos kuormituksen mukaan poikkeaa virtasärön muutoksista (kuva 22). Jännitteen kokonaissärö on lähes kokoajan keskiarvoisesti noin 8 % kohdalla, eikä juuri muutu kuormituksen muuttuessa. Kuormituksen kuvaan verrattaessa jännitteen kokonaissärö hieman laskee suurimman kuormituksen hetkellä, mutta vain vähän. Jännitesäröä esiintyy aina, eikä vain induktiuunin kuormituksen aikana. Virtasärö ei näyttäisi aiheuttavat jännitesäröä, ainakaan merkittävästi. Tästä voidaan päätellä, ettei jännitesärö ole peräisin induktiuunista, vaan jostain toisesta yliaaltolähteestä.

Tehtaalla on paljon yliaaltopitoista muuta kuormitusta, kuten ilmastoinnin taajuusmuuttaja lähtöjä ja suuritehoisia tyristoriohjattuja lämpökäsittelyuuneja. Nämä saattavat aiheuttaa jännitteen säröytymisen verkossa 8 %:n. Varmaksi näitä ei voida todeta, koska tämä vaatisi lisää jatkotutkimuksia, jotta yliaaltolähde saataisiin selville.



KUVA 22. Jännitesärö prosentteina (Ketola 2011)

## 5.5 Sähköverkon kokonaistilanne

Edellä kävimme läpi induktiuunin aiheuttamia verkkovaikutuksia muuhun sähköverkkoon. Tilannetta on syytä katsoa laajemmin koko sähköverkon kannalta, sillä yksittäisen laitteen vaikutukset eivät välttämättä aiheuta merkittäviä vaikutuksia muuhun sähköverkkoon.

Tehtaan sähköverkon 400 V:n tasossa on suoritettu jo kattava loistehonkompensointi estokelaparistoilla. Kompensointi on tasapainossa loistehon kulutuksen kanssa 400 V:n verkossa. 6 kV:n verkossa ei tällä hetkellä ole kompensointia. Ennen tämän keväällä 2011 asennetun uunin paikalla oli vanha induktiuuni, jolla oli kompensointi. Vanha induktiuuni oli teholtaan noin 1500 kW ja sillä oli 1500 kVAr:n kondensaattoriparisto. Kondensaattoriparisto oli induktiuunin rinnalla 6 kV:n verkon puolella. Kondensaattoriparisto lopulta rikkoontui, eikä sitä lähdetty enää korjaamaan tai uutta hankkimaan, koska induktiuuni alkoi olla myös tiensä päässä.

Ennen induktiuunin uusimista ja kondensaattoripariston rikkoutumista koko tehtaan 6 kV:n syötöstä mitattu kuukauden loistehohuippu oli luokkaa 0 kVAr, eli loistehoa ei otettu sähköverkosta. Tällä hetkellä samainen kuukauden loistehohuippu on luokkaa 300–700 kVAr eli loistehoa otetaan sähköverkosta. Tästä voidaan päätellä, että ennen

loisteho oli tasapainossa tehtaan verkossa, eikä sitä otettu yleisestä sähköverkosta. Nykyisin loistehotasapaino on pielessä ja se otetaan yleisestä sähköverkosta. Näin voidaan päätellä, että induktiouuni aiheuttaa tämän epätasapainon loistehoon. Induktiouuni saattaa ottaa osan loistehostaan 400 V:n puolelta, jos siellä on loistehoa saatavilla ja loput se ottaa yleisestä sähköverkosta.

Tämän hetkisestä sähköverkosta otetusta loistehosta voidaan laskea ilmaisosuudet huomioon ottaen laskutettava loisteho, kun tiedetään pätöteho huippukin. Laskutettavan loistehon määrällä saadaan määritettyä tarvittava kompensoinnin tarve. Tällä hetkellä kuukauden pätöteho huippu on noin 3000–3500 kW ja vastaavasti loisteho huippu noin 300–700 kVAr. Ilmaisosuudeksi arvioidaan 15 %. Näin saadaan kompensointi mitoitettua riittävän tarkasti, että vältetään loistehomaksuilta ja ei mennä ylikompensoinnin puolelle. Näillä arvoilla voidaan laskea laskutettavan loistehon määrä (kaava 13). Laskutettavaa loistehoa on suurimmillaan 250 kVAr (taulukko 5).

$$Q_{lask} = Q_{max} - kP_{max} \quad (13)$$

TAULUKKO 5. Arvio laskutettavasta loistehosta

$P_{max}$ (kW)	$Q_{max}$ (kVAr)	$k$ (kVAr/kW)	$Q_{lask}$ (kVAr)
3000	300	15	-150
3000	700	15	<b>250</b>
3500	300	15	-225
3500	700	15	<b>175</b>

Induktiouunin mittaustuloksista havaittiin 6 kV:n jännitteen olevan hyvin säröytynyttä. Jännitteen kokonaissärö oli keskiarvoisesti 8 % ja vaihteli 6–10 % välillä. Merkittävin yksittäinen yliaaltojännite on 5. yliaalto, joka on vajaan 8 %. Se ylittää standardin SFS-EN 50160 salliman 6 %:n raja-arvon. Lisäksi jännitteen kokonaissärö 8 % on standardin raja-arvolla, joten yliaaltoja on suodatettava.

Yliaaltovirtojen suuruutta ei voida verrata suosituksiin, koska niitä ei mitattu jakeluverkon liittymiskohdasta, vaan ainoastaan induktiouunin lähdöstä. Induktiouunin ottamaan virtaan nähden ne ylittävät suositellut rajat, mutta tämä ei kerro tehtaan koko tilannetta yliaaltovirtojen osalta. Yliaaltovirrat ovat suosituksia ja jännitteelle asetettu standardi SFS-EN 50160 on ensisijaisesti määräävä.

## 5.6 Yhteenveto

Induktiouunin mittaustulosten ja verkon kokonaistilan perusteella tehtaalle tarvitaan keskitetty loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus 6 kV:n verkkoon. Induktiouuni aiheuttaa loisteho-ongelman muuhun sähköverkkoon ja sen tarvitsema loisteho otetaan sähköverkosta. Induktiouuni ei aiheuta yliaalto-ongelmaa, vaan jännitesärön 6 kV:n verkkoon aiheuttaa jokin toinen laite, joka on mahdollisesti 400 V:n verkossa. Jännitesärön selvittämiseen ja oikeantyyppisen kompensointilaitteiston mitoittamiseen tarvitaan vielä jatkotutkimuksia mittaamalla.

### 5.6.1 Tarvittava laitteisto

Verkon yliaaltopitoisuuden ollessa suuri, on käytettävä yliaaltosuodatinta. Yliaaltosuodatin poistaa yliaaltoja verkosta ja tuottaa tarvittavan loistehon. Yliaaltosuodatin on viritettävä 5. yliaallolle eli 250 Hz:lle, koska kyseinen harmonin yliaaltotaajuus on suurin esiintyvistä yliaalloista ja muita ei ole tarvetta suodattaa pois.

Yliaaltosuodattimella on syytä suorittaa keskitetty kompensointi 6 kV:n verkossa. 400 V:n verkko on kompensoitu jo kauttaaltaan estokelaparistoilla ja siellä ei ole loistehon kompensoinnin tarvetta. Mittaustuloksista havaittiin jännitteen säröytyvä muusta kuin induktiuunin aiheuttamista yliaaltovirroista. Tämän todennäköisesti aiheuttaa jotkin 400 V:n verkon olevat yliaaltolähteet, kuten esimerkiksi suuritehoiset taajuusmuuttajakäytöt ja tyristoriohjatut lämpökäsittelyyunit. Yliaaltolähteen selvittämiseen tarvitaan vielä jatkotutkimuksia mittaamalla. Verkon yliaaltopitoisuus on liian korkea siihen, että estokelaparisto pystyisi suodattaman syntyneet yliaallot pois 400 V:n verkon puolella. Yliaaltosuodatin sijoitettuna keskitetysti 6 kV:n verkkoon suodattaisi yliaallot pois, jotka tulevat 400 V:n verkon tasosta sekä tuottaisi tarvittavan perustaajuuden loistehon induktiuunille.

### 5.6.2 Jatkotoimenpiteet

Mitoittaessa kompensointilaitteistoa, on tehtävä vielä jatkotutkimuksia mittaamalla. Tässä työssä käytetyt mittaustulokset olivat suuntaa antavia ja kartoittivat induktiuunin

vaikutuksia muuhun sähköverkkoon. Mittaustuloksista kävi ilmi, että jatkotutkimukset ovat tarpeellisia, että oikeantyyppinen kompensointiratkaisu voidaan mitoittaa ja toteuttaa. Työn mittaustulokset suoritettiin Dranetz 4300 -verkkoanalysaattori, joka soveltuu hyvin kartoitus mittauksiin. Jatkotutkimukset on syytä toteuttaa käytettyä mittalaitetta tarkemmalla laitteella, jotta mittaustuloksena saadaan tarkat tiedot verkon käyttäytymisestä erilaisilla kuormituksilla. Lisäksi pitää saada kuormituksen dynamiikka selville, että saadaan selville kuormituksen vaihtelunopeus, jotta voidaan valita oikeantyyppinen kompensointilaitteisto. Tarkka tieto tarvittavasta perustaajuisesta loistehosta selviää jatkotutkimuksissa. Suoritetuissa mittauksissa selvisi ainoastaan induktiouunin kokonaisloistehon osuus, joka oli kapasitiivista yliaaltojen seurauksena eli induktiouuni tuottaa kokonaisloistehoa verkkoon. Perusaallon tehokerroin oli induktiivinen, joka tarkoittaa sitä, että induktiouuni ottaa perustaajuisia loistehoa 6 kV:n verkosta. Perustaajuisia loistehoa myös laskutetaan, joten kompensointi on tarpeellinen. Verkon kokonaistilannetta katsoessa loistehon osalta, käytössä oli vain mittaustulokset laskutusmittarilta kuukauden loistehohuipuista laskutuspisteestä. Kuukauden loistehohuippu vaihteli viimeisen vuoden aikana välillä 300–700 kVAr ja arvio laskutettavasta loistehosta on suurimmillaan 250 kVAr. Tämä ei välttämättä kerro koko totuutta loistehotilanteesta. Yliaaltotilanne on myös syytä selvittää laskutuspisteestä jännitesärön ja yliaaltovirtojen osalta uudestaan kompensointilaitteiston soveltuvuuden kannalta.

### 5.6.3 Kompensoinnin sijoitus

Kompensointi on suoritettava keskitetysti 6 kV:n verkossa ja tämä tarkoittaa laitteiston liittämistä tehtaan jakamoon 6 kV:n kiskostoon. Jakamossa ei juuri ole tilaa kompensointilaitteistolle, joten ehdotan sijoittamistilaksi nykyistä Flexim-varastoa. Tila sijaitse ihan jakamon vieressä, joten pitkiä kaapelivetoja ei tarvita laitteiston liittämiseksi 6 kV:n verkkoon. Laitteisto liitetään katkaisijalla keskitettyyn kiskostoon. Tila pitää luokitella sähkötilaksi ja tyhjentää muista tarvikkeista. Tilaan tarvitaan myös asianmukainen jäähdytys.

Induktiouunin rinnalle 6 kV:n puolelle ei ole kannattavaa asentaa kompensointia, koska induktiouuni ei aiheuta jännitteen säröytymistä. Muun verkon yliaaltojen suodatusta ei ole järkevää suorittaa induktiouunin lähdön katkaisijan takaa, koska induktiouunille tehtäessä huoltotoimenpiteitä on katkaisija auki ja tällöin kompensointi ei suodata



muussa verkossa jatkuvasti esiintyviä yliaaltoja. Induktionuunin muuntajan toisiopuolella ei ole järkevää asentaa kompensointia, koska jännitetaso on 535 V ja muuntajalla on kaksi toisiokäämiä. Jännitetaso ei ole kovin yleinen ja kompensointilaitteistoja jouduttaisiin tekemään kaksi, koska toisiojännitteet ovat keskenään 30° vaihesiirrossa.

#### **5.6.4 Kompensoinnin vaikutukset**

Loistehon kompensoinnilla vältetään loistehomaksu, eli saadaan taloudellista hyötyä verrattaessa siihen, että loisteho ostettaisiin sähköverkosta. Laskutettavaksi loistehoksi arvioitiin suurimmillaan 250 kVAR kuukautta kohden. Yleisellä tasolla loistehon laskutushinta vaihtelee 1,25–4,36 €/kVAR kuukautta kohden riippuen ilmaisosuudesta. Loistehon kompensoinnilla voidaan siis saada merkittävää taloudellista hyötyä.

Loistehon kompensoinnilla saavutetaan myös teknistä hyötyä, kuten verkon siirtokapasiteetin lisäys, häviöiden pienentyminen kaapeleissa, muuntajissa ja keskuksissa sekä pienennetään jännitteen alenemaa. Häviöiden pienentymisellä saavutetaan rahallista hyötyä. Yliaaltojen suodatuksella parannetaan sähkön laatua. Jännitesärön THD pienentäminen vaikuttaa elektroniikkaa sisältävissä sähkölaitteissa esiintyvien häiriöiden ja vikojen vähenemiseen. Tämä vaikuttaa siihen, että arvaamattomat ja kalliit keskeytykset vähenevät. Yliaallot ylikuormittavat muuntajia ja moottoreita eli aiheuttavat häviöitä, jotka näkyvät ylimääräisenä lämpenemisenä. Yliaallot aiheuttavat lisäksi releiden ja sulakkeiden toimintahäiriöitä.

## 6 POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä pureuduttiin Metso Paper Oy Valkeakosken tehtaalla olevan induktiounin aiheuttamiin loisteho- ja yliaalto-ongelmiin sähkönlaatumittauksen mittaus- tulosten pohjalta ja analysoitiin induktiounin vaikutusta sähkönlaatuun yksittäisenä laitteena, sekä arvioitiin koko sähköverkon tilannetta. Työssä perehdyttiin ilmenneiden ongelmien taustoihin sekä arvioitiin niiden vaikutusta sähköverkossa sähkönkäyttäjän näkökulmasta. Lisäksi käytiin läpi standardien ja suositusten raja-arvoja jakelujännitteen ja virran harmonisille yliaalloille.

Sähkönlaadun parantamiseksi perehdyttiin sopiviin laiteratkaisuihin. Työssä käytiin läpi loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatuksen sopivia laitteistoja erityyppisissä ongelmissa ja käyttökohteissa. Kompensointilaitteiston mitoitus ja valinta perusteisiin myös tutustuttiin. Lisäksi otettiin kantaa kompensoinnilla saavutettaviin taloudellisiin ja teknisiin hyötyihin, sekä mahdollisiin haittatekijöihin.

Työssä käytiin läpi mittauskohteena olleen induktiounin toiminta ja keskeiset laitteis- ton osat. Laitteisto piti sisällään paljon tehoelektroniikan komponentteja ja ratkaisuja, joilla pystyttiin muun muassa rajoittamaan yliaaltojen syntymistä.

Sähkönlaatumittaukset suoritettiin Tampereen Veran toimesta ja sain kyseiset mittaus- lokset käyttööni, jotta pystyin tutkimaan ja analysoimaan induktiounin aiheuttamia ongelmia muuhun sähköverkkoon. Mittaustuloksissa tutkiessa ja analysoidessa pureu- duttiin eri sähköisissä suureissa tapahtuviin muutoksiin induktiounin kuormitustilan- teesta ja pohdittiin niiden taustoja. Lisäksi muodostettiin kokonaiskuvat aiheutuvista ongelmista.

Lukijalle pyrittiin kasaamaan tuloksista olennainen tieto ymmärrettävässä muodossa. Esitin näkemyksiäni induktiounin aiheuttamista ongelmista ja muun sähköverkon ti- lanteesta. Induktiounin vaikutuksista ja tehtaan sähköverkon kokonaistilanteesta pyrin luomaan kokonaiskuvat mittaustulosten ja kokemuseräisen tiedon pohjalta, jota sain tehtaalta.

Näiden pohjalta esitin näkemykseni kompensointiratkaisusta, sen sijoittamisesta ja jatkotoimenpiteistä. Pyrin pohtimaan kompensoinnin eri tarpeita sähköverkon kannalta, kuten loistehon kompensointia ja yliaaltojen suodatus. Tähän vaikutti ilmenneet ongelmat, joita havaitsin mittaustuloksista. Loistehon tarve syntyi induktiouunista ja yliaallot syntyivät muussa verkossa olevista kuormituksista. Tulin siihen lopputulokseen, että keskitetty kompensointi 6 kV:n verkossa on paras tapa toteuttaa loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus kyseisen sähköverkon tilanteessa. Kompensointi toteutettaisiin yliaaltosuodattimella. Jatkotutkimuksille on tarvetta, että saadaan tietoon tarvittava perustajuisen loistehon määrä ja tarkka kuvaus liittymän yliaalto tilanteesta. Näin saadaan mitoitettua kompensointilaitteisto oikean kokoiseksi.

Toivottavasti opinnäytetyöstäni on jatkossa hyötyä Metso Paper Oy Valkeakosken tarpeisiin. Pyrin antamaan oman näkemykseni induktiouunin vaikutuksista ja sähköverkon kokonaistilanteesta sekä esittämään kyseisiin ongelmiin ratkaisun laitekokonaisuuksiin ja jatkotoimenpiteineen.

Opinnäytetyö kokonaisuudessaan oli haastava ja sitä kautta opettava kokonaisuus sähköverkossa esiintyvistä ongelmista, jotka ovat nykypäivän maailmassa vaan lisääntymään päin. Opin henkilökohtaisesti paljon opinnäytetyö prosessin aikana.

## LÄHTEET

ABP Induction. 2011. Taajuusmuuttaja ja ohjauselektroniikka induktiouuneille - käyttöohje. Luettu 31.1.2013.

Dranetz BMI PP4300 Data Sheet. Luettu 25.2.2013.

<http://www.mrtestequipment.com/datasheets.php>

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot I. Järjestelmäteknikka ja sähköverkon laskenta. 1. painos. Helsinki: Otatieto.

Kauppila, J., Tiainen, E. & Ylinen, T. 2009. Sähköasennukset 3. Espoo: Sähköinfo Oy.

Ketola, J. 2011. Tampereen Vera Oy. Sähkönlaatumittauksen mittaustulokset. Tulostettu 14.12.2012.

Keskinen, R. & Niemi, P. 2011. ValuAtlas & Tampereen ammattiopisto – Valumetallien sulatus. Induktiouunit. Luettu 3.4.2013.

[http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN\\_sulatustekniikka\\_07.pdf](http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_sulatustekniikka_07.pdf)

Lehtomäki, E., Mäkinen, A., Parvio, L., Salminen, H., Seesvuori, R. & Seppälä, A. 2001. Jakeluverkon sähkön laadun arviointi. Helsinki: Sähköenergialiitto ry SENER.

Männistö, M., Hietalahti, L., Seesvuori, R., Seesvuori, V. & Wilén, T. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo Oy.

Naskali, R. myyntipäällikkö. 2010. Sähköverkon kompensoinnista suurjännite-, keski-jännite- ja jakeluverkoissa. Seminaari. Sähkönlaatu ja mittaukset tulevaisuuden sähköverkoissa. 11.2.2010. MIKES. Espoo. 1–34.

Seesvuori, R., Böstman, R., Hiltunen, I., Laitinen, M., Mäkinen, A., Salovaara, A. & Sotikov, J. 1999. Loistehon kompensointi ja yliaaltojen rajoittaminen. Helsinki: Sähköenergialiitto ry SENER.

Uusimäki, J. 2004. ST-kortti 52.15. Loistehon kompensointi pienjänniteverkossa. Espoo: Sähköinfo Oy.